

Tartu Ülikool  
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond  
Ökoloogia ja maateaduste instituut  
Geograafia osakond

Magistritöö geoinformaatikas ja kartograafias

**IDA-VIRUMAA LINNADES TOIMUNUD MUUTUSED SPEKTRAALSE  
SEGU LAHUTAMISE MEETODIL**

Kaidi Erik

Juhendaja: dotsent Urmas Peterson  
professor Ülo Mander

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

Tartu 2013

# SISUKORD

SISSEJUHATUS .....	3
1. TEOREETILINE ÜLEVAADE .....	4
1.1 Linnastumine.....	4
1.2 Linnade uurimine kaugseire vahenditega .....	4
1.3 Spektraalse segu lahutamise meetod .....	6
1.4 Algliikmete leidmine .....	8
1.5 VIS (vegetation – impervious surface – soil) mudel.....	8
2. MATERJAL JA METOODIKA .....	11
2.1 Uuritavad alad .....	11
2.1.1 Jõhvi .....	11
2.1.2 Kohtla-Järve .....	11
2.1.3 Narva .....	11
2.2 Kasutatud pildid ja tarkvara .....	12
2.3 Metoodika .....	12
3. TULEMUSED JA ARUTELU .....	19
3.1 Spektrisegu lineaarne lahutamine .....	19
3.2 Linliku keskkonna osakaal veahinnangu proovilappides .....	22
3.3 Aastate 1985 kuni 2011 vahemikus linnades toimunud muutused .....	30
KOKKUVÕTE .....	38
SUMMARY .....	39
KASUTATUD KIRJANDUS .....	41
LISAD .....	45

## SISSEJUHATUS

Maakera rahvaarv ületas 2011. aastal 7 miljardi piiri. Seoses elanikkonna kasvuga, laienevad kiirelt ka linna-alad, mis nii tänapäeval kui ka tulevikus mõjutavad ja tekitavad juurde keskkonna-alaseid kitsaskohti. Nende probleemide lahendamine toob kaasa vajaduse hinnata täpselt linlikke olusid. Kuigi linna-alad katavad maismaa pindalast väikese osa, on see pind kiiresti laienemas, sest nii rahvastiku üldise kasvu kui ka migratsiooniga linnakeskkonda hõivatakse uusi alasid linnade äärealadel põllumaade ja metsade arvelt.

Samal ajal kui kiire linnastumise ületab võime hallata, organiseerida ja planeerida uusi asundusi, on tihti raskem ülesanne dokumenteerida ja mõõta minevikus toimunut. Paljudel juhtudel on ruumiline, kvantitatiivne ja kvalitatiivne andmestik linna laienemisest ka olemas. Sageli on need andmed tihti raskesti ligipääsetavad või keelatud; nad on harva keskselt kokku kogutud, täielikud, järjepidevad, standardselt dokumenteeritud, saadaval aegjärjestusena või võrreldavad teiste linnadega (Taubenböck 2012).

Esimeste satelliitide käikulaskmisest alates on kaugseiremeetodid pakkunud erinevaid võimalusi linnakeskkonna uurimiseks. Kasutusele on võetud erinevaid analüüsimeetodeid, samuti on toimunud suur areng tehnilises võimekuses. Nõudlike ja kiirelt muutuvate linna-alade uurimine põhinebki nendel arengutel. Kuigi me ei pruugi täielikult mõista dünaamilisi linnakeskkondi, suureneb nendest arusaamine andmetike ja analüüsimeetodite arengu käigus. Kombineerides erinevaid sensoreid (optilisi ja radareid) ja meetodeid (kaugseire, GIS, GPS, kvantitatiivsed meetodid, uuringud kohapeal jne), on võimalus mõõta, kaardistada ja jälgida täpselt ümbritsevat keskkonda (Gluch 2006).

Maailmas teaduskirjanduses on linnade kaugseirega tegeletud kümneid aastaid, kuid Eestis on teemat uurinud vaid Tõnis Kärdi, kes oma magistritöös käsitles Tartu linna (Kärdi 2007). Käesoleva töö eesmärgiks oli hinnata Ida-Virumaa linnades toimunud muutusi spektraalse segu lahutamise meetodil. Linnadeks valiti Jõhvi kui maakonnakeskus, Kohtla-Järve ja Narva kui pindalalt ja rahvaarvult suurimad maakonna linnad. Töös kasutati Landsat TM (*Thematic Mapper*) satelliidipilte ning mõõdeti roheliste pindade ja linliku keskkonna osakaalu linnas. Tulemuse täpsust hinnati Eesti Põhikaardi järgi.

Magistritöö esimeses osas antakse ülevaade linnastumisest ja kaugseire kasutamisest linnades. Samuti kirjeldatakse spektrisegu lahutamise meetodit, spektrisegu algliikmete valimist ning VIS (*vegetation – impervious surface – soil*) mudelit, mis käsitleb taimkatte, vettpidava pinna ja mullapinna suhet pikslis. Teises osas tutvustatakse töö käiku ning metoodikat. Kolmandas osas tuuakse välja saadud tulemused ja arutletakse tulemuste sobivuse üle.

# 1. TEOREETILINE ÜLEVAADE

## 1.1 Linnastumine

Maakera rahvastikust pool elas 21. sajandi esimesel kümnendil linnaaladel ning 2050. aastaks ennustatakse, et ligikaudu 72% kogu planeedi elanikkonnast ehk 6,3 miljardit elab linnades. Sajandi keskpaigaks elab linnades sama palju inimesi, kui 2002. aastal kogu planeedil kokku (World urbanization 2012). Linnaelanikkonna kiire kasv on globaalne nähtus, mis toob esile erinevaid sotsiaalseid ja keskkonna-alaseid probleeme, mis mõjutavad arenenud ja arengumaade linnasid mõnevõrra erinevalt. Arengumaade sotsiaal-majanduslikud probleemid põhjustavad miljonite inimeste elamise slummides, samal ajal kui heal järjel olevates linnades muretsetakse enim linnakeskkonna pärast. Arengutasemetelt erinevate linnaaladele on siiski oluline hankida informatsiooni valitsuste abistamiseks planeerimisel ja juhtimisel, millest olulisem on rahvastiku arv ja selle muutused koos elanike paiknemise ja teenuste kasutamisega linnas (Nichol 2009).

Urbaniseerumine ehk linnastumine on protsess, mille tulemusel kontsentreerub suur hulk inimesi püsivalt suhteliselt väikestele aladele, moodustades linnu (Encyclopaedia Britannica 2013). Linnade määratlus võib ajas ja ka riigiti muutuda, kuid sageli mõeldakse linnastumise all enamasti demograafilist protsessi. Linnastumine on Euroopa asustuse üks põhitunnuseid, linnad ja nendega seotud võrgustikud on alati olnud muutuste käivitajateks ja seeläbi oma ümbruskonda kujundanud (Antrop 2004). Tänapäevase linnaruumi puhul on tegemist tehismaastikuga, mille juures muudetakse traditsioonilisi maastikuelemente (Antrop 2005), killustatakse seniseid maastikke ning luuakse ruumilist mitmekesisust (Antrop 2004).

Linnastumise puhul kirjeldatakse erinevaid faase. Esimeses faasis toimub rahvastiku koondumine maalt linnadesse, mis on üldjuhul põhjustatud sotsiaalsetest ja majanduslikest muutustest. Teises faasis jätkub kogu linna rahvaarvu kasv, kuid vähenedes kesklinnas ja suurenedes linnaservades. Kolmandas faasis jätkub inimeste lahkumine kesklinna piirkonnast, kuid rahvastik hakkab vähenema ka linnaservades ja seeläbi kogu linnaalal. Neljandas faasis hakkavad inimesed algul kesklinna piirkonda ja hiljem ka äärelinnadesse tagasi kolima (Antrop 2004). Linnastumise tulemuseks on seega spetsiifiline maakasutus- ja ehitatud keskkond.

Tõenäoliselt jätkub ülemaailmselt trend linnastumise suunas. Rahvastik muutub aina mobiilsemaks. Selle tulemusel on nende koondumist küladest metropolideni üha keerulisem hinnata ja juhtida. Arenenud riikides on peamiseks muredeks viljakate põllumaade linnastamine, õhu kvaliteet, vee kvaliteet, jäätmed ning linnaalade laienemine. Arengumaades seisnevad probleemid maa jätkusuutlikkuses, slummistumises ja puhtas joogivees. Need on ainult mõned aglomeratsioonidega seotud keskkonnaprobleemid, mida kaugseire tuvastada aitab (Gluch 2006).

## 1.2 Linnade uurimine kaugseire vahenditega

Globaalne linnastumine on keskkonnamuutuste peamiseks vormiks, mis mõjutab otseselt inimeste asustust. Kuigi linnad katavad pindalaliselt väikese osa maismaast, mõjutavad nad peaaegu poolt Maa elanikkonnast. Linnakeskkonna tegeliku arengu mõistmiseks on vaja

kindlaks määrata teatud keskkonna võtmeparameetrid. Paljusid olulisi keskkonnaparametreid linnades saab kõige paremini mõõta kohapeal, kuid mõned näitajad on paremini kättesaadavad kaugseire abiga (Small 2002).

Satelliidipilte on keskkonnauuringutes kasutatud juba 1970. aastate algusest, kui Landsat MSS tootis esimese pildi (Hung 2002). Kaugseire meetodid võimaldavad kirjeldada, jälgida suhteliselt hiljutisi maakatte muutusi ning ennustada tulevase arengusuundi. Warner *et al.* (2009) on väitnud, et kaugseire meetoditel on mitmeid tugevaid külgi maa muutuste uurimiseks:

1. Kaugseireandmed on objektiivsed ning andmed erinevatel pildidel on omavahel võrreldavad.
2. Kaugseireandmed on ruumiliselt täpsed ning suhteliselt ühetaolise mõõtkavaga.
3. Iga piltidest on üles võetud suhteliselt lühikese aja kestel, ehkki pildid, mis on kokku liidetud annavad informatsiooni pikemate perioodide vältel.
4. Andmeid suurte pindade kohta saab kiiresti hankida. See on regionaalsete ja globaalsete uuringute oluline omadus.
5. Andmete kogumine on korratav, see on aja jooksul toimuvate muutuste monitooringul oluline.
6. Piltide arhiivid on algandmeteks, mida saab kasutada keskkonnamuutuste hinnanguiks, mis võivad vajalikuks osutuda alles tulevikus.
7. Kaugseirepilte saab kasutada teadustulemuste populariseerimiseks

Kaugseire pakub häid võimalusi linnade uurimiseks, kuigi tegelikkuses on linna-alasid väga keeruline uurida. Esiteks on asi andmetes: rahvastikku ja maakasutust ei saa otseselt maa pealt ega ka kaugseire-platvormidelt uurida ning inimesed on väga liikuvad (Nichol 2009). Teiseks on vähetõenäoline, et optilise ja mikrolainepiirkonna sensorid on võimelised saavutama sama täpseid rahvastikuandmeid, kuigi maakatte kaugseire pildid võivad täiendada ametliku rahvaloenduse teel saadud elanikkonna paiknemise ruumilisi piire (Miller ja Small 2003). Sama kehtib ka linliku keskkonna kvaliteedi kohta, mis on enamasti subjektiivne ning põhineb omadustel, mis linna piires varieeruvad. Linna-alad on keerulised nende ruumilise ja spektraalse eripära tõttu, mis on seotud linna suuruse, kuju ja objektide orienteerituse tõttu. Varjude esinemine kõrghoonestusega aladel ning suurte vertikaalsete mõõtmatega objektide (kõrgete objektide) moonutused parallaxi tõttu pildistamisel piiravad kõrge resolutsiooniga kaugseirepiltide kasutamist (Nichol 2009).

Lisaks on piiratud ka sensorite ruumiline ja spektraalne resolutsioon. Näiteks ei suudetud 1970. ja 1980. aastatel väikese ja keskmise ruumilise resolutsiooniga satelliitidelt eristada üksikuid hooneid. Alates 21. sajandi algusest pildistavad suure resolutsiooniga (1-5m) sensorid, kuid andmete ruumilise ja spektraalse detailsuse suurenemine pole oluliselt parandanud piltide programset tõlgendamist. Seda seepärast, et suure resolutsiooniga pildidel on spektraalne erinevus objektide siseselt suurem kui objektide vaheliselt ning meetodid selliste objektide tõlgendamiseks pole piisavalt hästi arenenud (Nichol 2009).

Kaugseire kõige edukamad rakendused linnakeskkonnas hõlmavad endas füüsikaliste keskkonnaparametrite mõõtmist. Üks esimesi selliseid rakendusi oli 1977. aastal aluspinna temperatuuri ja selle seose selgitamine linnakliimaga ja linna soojussaarte efektiga. Landsat TM soojuskiirguse piirkonna pilti on kasutatud päikesekiirguse mõju uurimisel Singapuri

linna mikrokliimale (Nichol 1996). Linnakeskkonna taimkattel on oluline osa kliimale, sest see mõjutab temperatuuri ja õhu saasteainete hulka. Landsat TM pildid on olnud kasulikud New Yorki linna taimkatte kaardistamisel ning saadud tulemused näitavad linnaosade vahelist mitmekümneprotsendilist varieeruvust taimkatte pindalas. Nendel erinevustel taimkattes on otsene mõju kiirgusbilansile, aurustumisele, mikrokliimale ja linnaõhu tsirkulatsioonile. Seetõttu pakuvad detailsed taimkattekaardid võimalusi piiritleda kohalikke kliimamudeleid (Miller ja Small 2003).

Maa vaatlusandmete kasutamisel linnade uurimisel on viimastel kümnenditel olnud suur huvi. Kaugseireandmeid on kasutatud rahvaarvu hindamisel, linnade laienemise ja maakasutuse mõõtmiseks (Miller ja Small 2003). Kindlaks on tehtud ka linnade/eeslinnade omadused, mida on võimalik mõõta kaugseirevahenditega. Järjest enam suureneb nõudlus kõrge resolutsiooniga piltide järele. Satelliidil Landsat jääb puudu ruumilisest resolutsioonist infrastruktuuri jälgimiseks, kuid see pakub nüüdseks ligi kolmekümneaastaseid aegridu linnade maakatte muutuste jälgimiseks. Samuti pakuvad keskmise ruumilise lahutusega sensorid laiade maa-alade katvust piltidel, see on vajalik tervete linnade ühel hetkel pildil jäädvustamiseks. Seega saab neid kasutada linnade võrdlevaks analüüsiks (Miller ja Small 2003).

Linnade maakatte ja maakasutuse uuringud on muutunud väga detailseks. Kaugseirevahendite ruumilise ja spektraalse resolutsiooni kasv on teinud võimalikuks linna maakatte iseloomustamise, pindalade määramise ja muutuste jälgimise. See on toonud kaasa mõju poliitikale. Postindustriaalsel ajal on põllumaade linna-aladeks muutumise jälgimine saanud riiklikeks ning samas ka ülemaailmseks huviks. Ülemaailmse rahvastiku kasvuga ning linnade suurenemisega muudetakse paljud viljakad põllumaad linna-aladeks. Sellel on aga pikaajalised mõjud maakera jätkusuutlikkusele. Kaugseirel on head võimalused pakkuda probleemi lahendamiseks adekvaatseid andmeid (Gluch 2006).

Kõige suuremaks probleemiks linnade kaugseires on segupikslid. Segupikslid on pikslid, milles on esindatud rohkem kui üks maakattetüüpidest. Segupikslite olulisus linnakeskkonnas tuleneb linnade maakatte heterogeensusest. Näiteks on keskmise ruumilise lahutusega skanneri Landsat TM piksli suuruseks 30 meetrit. Üpris keeruline on leida linnas sellise suurusega ala, kus pikslis on ainult üks maakattetüüp. Paratamatult koosnevad linna-alad segupikslitest. Nendega töötamine on üks lahendustest linnade kaugseire uuringutes. Hägus esitus (*fuzzy representation*) üheks võimalikuks lahenduseks. Lisaks on vaja mudelit heterogeense linnakeskkonna lihtsustamiseks, mis kergendaks kvantitatiivse analüüsi läbiviimist (Hung 2002).

### 1.3 Spektraalse segu lahutamise meetod

Small ja Miller (2001) on väitnud, et linna maakatet iseloomustav ruumiline detailsus ja spektraalne mitmekesisus linnakeskkonna kaugseirel tõstatab tõsiseid probleeme traditsiooniliste pilditöötluse algoritmide kasutamisel. Varasemates uuringutes on palju kasutatud keskmise ruumilise lahutusega kaugseire andmete töötlusel kasutatud nn jäikasad klassifitseerimisalgoritme, mis omistavad igale pikslile ühese klassikuuluvuse (Treitz et al. 1992, cit Michishita 2012). Paraku on see klassifitseerimisviis osutunud linnakeskkonna analüüsimisel vähetõhusaks, sest keskmise ruumilise lahutusega piltidel pole üks piksel ainult ühest maakatteklassist (Wu 2004). Linnas, kus aluspinnalt peegelduv kiirgus varieerub

tunduvalt enamike satelliitide sensorite hetkvaatevälja piires, ei sarnane üksiku piksli spektraalne peegeldumine üksiku maakatteklassi peegeldumisega, vaid on segu kahest või enamast objektist. Juhul kui tegemist on spektraalselt erinevate maakatte tüüpide kombinatsioonidega, klassifitseeritakse tihti segupikslid teistesse maakatteklassidesse.

Üheks enamkasutatud võimaluseks mingi maakatteklassi pikslisese ulatuse kindlakstegemisel on spektrisegu lahutamise meetod. See arendati välja 1990. aastate algul suure spektraalse lahutusega spektromeetri HSR AVIRIS (*High Spectral Resolution Advanced Visible/Infrared Image Spectrometer*) piltide tõlgendamiseks. Hiljem kohandati meetodit ka satelliidi Landsat piltide jaoks (Lunetta 1998, cit Kärdi 2008).

Spektraalse segu lahutamise meetod on edukat kasutamist leidnud metsade kaugseires (Lu *et al.* 2003) ja linnakeskkonna taimkatte kaugseires (Small 2001). Meetodi eeliseks on see, et sellega saab kaardistada juba suhteliselt väikeseid muutusi maakattes.

Lu ja Weng (2006) on väitnud, et lineaarse spektrisegu lahutamine eeldab, et sensori mõõdetud spektrid on lineaarseks kombinatsiooniks kõikide komponentide spektritest (algliikmetest) pikslis ning algliikmete spektraalne vahetegur esindab ala proportsioone, millel on eristuvad maakatteklassid (Adams *et al.* 1995). Samas toonitatakse, et lineaarse segunemise eeldus kehtib juhul, kui domineerib ühekordne hajumine erinevatelt aluspindadelt ning aluspinnatüüpide vaheline mitmekordne hajumine on tühi. Juhul, kui võib eeldada mitmekordset hajumist taimkattelt ja taimkatteta mullapinnalt, tuleks arvestada mitte-lineaarse spektriseguga. Kuigi mitmekordne hajumine võib osutuda oluliseks, võib eelnevatest uuringutest lähtudes lugeda spektrisegu linnade puhul peamiselt lineaarseks (Adams ja Gillespie 2006).

Weng *et al.* (2004) on väitnud, et seega võrdub lineaarse segunemise puhul pildi ühe piksli heledus piksli piiresse jäävate objektide heleduste pindalaga kaalutud summaga pikslis:

$$R_i = \sum_{k=1}^n f_k R_{ik} + ER_i$$

kus  $i = 1, \dots, m$  (spektraalkanalite arv);  $k = 1, \dots, n$  (algliikmete arv);  $R_i$  on piksli heledus kanalis  $i$ ;  $f_k$  on algliikme  $k$  fraktsiooni suurus pikslis;  $R_{ik}$  on algliikme  $k$  heledus kanalis  $i$ ; ja  $ER_i$  on kaasnev jääk kanalis  $i$ . Kusjuures:

$$\sum_{k=1}^n f_k = 1 \text{ ja } 0 \leq f_k \leq 1$$

ja esimese valemi jääkide alusel leitav mudeli ruutkeskmise viga:

$$RMS = \sqrt{\sum_{i=1}^m (ER_i)^2 / m}$$

On märgitud (Kressler ja Steinnocher 1999), et spektrisegu lahutamise tulemuste hindamisel on lisaks mudeli ruutkeskmisele veale võimalik kasutada ka spektraalse segu lahutamise tulemuspiltide visuaalset hindamist, mis eeldab uurijalt piirkonna küllaldast tundmist ja lisainformatsiooni allikate olemasolu.

Kui segunemine algliikmete spektrite vahel on enamjaolt lineaarne ning algliikmed on teada *a priori*, on võimalik eraldada üksikuid piksleid hinnates iga algliikme fraktsiooni segupiksli komplekses peegeldumises (Small ja Miller 2001).

## 1.4 Algliikmete leidmine

Lineaarse spektrisegu puhul on oluliseks teguriks algliikmete valik ning selleks otstarbeks on arendatud mitmeid meetodeid (Lu *et al.* 2003). Rangelt öeldes on algliige lihtsalt spektrisegu koostisosa. Kuid see definitsioon pole kaugseires piisav. Algliikmed peavad aitama interpreteerida spektraalseid pilte. Huvi pakuvad algliikmete vahelised ruumilised suhted, mis esindavad objekte maapinnal. See tähendab, et peame valima algliikmed, mis pildi tõlgendamisel tähendust omavad. Mõnikord saab algliikmeid valida lihtsalt, kui on teada maapinnal asuvate objektide asukoht. Seda eriti siis, kui uuritakse mingil ajaperioodil toimunud keskkonnamuutusi. Tundmatute alade puhul eksperimenteeritakse sobivate algliikmete leidmisel (Adams ja Gillespie 2006).

Algliikmete leidmiseks on kaks põhilist moodust: algliikmete tekitamine spektraalpiltidelt endalt ja laboreis ja/või kohapeal mõõdetud nn puhaste algliikmete spektrite kasutamine. Algliikmeid, mis on saadud piltidelt, nimetatakse pildi-algliikmeteks, uuritava alal või laboriallikatest saadud algliikmeid kutsutakse referentsalgliikmeteks (Adams ja Gillespie 2006). Praktikas kasutatakse kõige rohkem pildilt valitud algliikmeid, sest pildi-algliikmeid esindavad spektreid, mis on pildi andmestikuga samas heleduse mõõtkavas ning ei vaja täiendavat kalibreerimist (Lu ja Weng 2006).

Algliikmete valimise muudab keerukas ka ühetaolise maakattetüübi heleduse varieeruvus. On olemas mitmeid erinevaid meetodeid projekteerida andmestikku uuele koordinaatsüsteemile suurema spektraalse kontrastsuse saavutamiseks pildi komponentide vahel (Adams ja Gillespie 2006). Tavaliselt kasutatakse selleks peakomponentide (*principal component analysis* ehk PCA) või suurima mürafraktsiooni (*maximum noise fraction* ehk MNF) analüüsi (Small 2001). Peakomponentide teisendus on lineaarne teisendus, mis projekteerib kõik erinevates spektripiirkondades mõõdetud heledusväärtused statistiliselt määratud telgedele, mis toimivad uute andmekanalitena. Esimene peakomponent tähistab andmestiku kõige suuremat varieeruvust. Teine peakomponent tähistab järgmist suurima varieeruvuse sihti mitmemõõtmelises andmestikus jne. Kui kanali DN (*digital numbers*) väärtused projekteeritakse peakomponentide teljele, saavad nendest uued DN-väärtused, mida saab pildina kuvada. Eesmärk on selgitada spektraalseid erinevusi, mida algsetest kanalitest oleks raske eristada (Adams ja Gillespie 2006). Luuakse spektraalsed hajusparved ning nende äärmuspunktid valitakse algliikmeteks pärast referentsandmete kontrollimist (Wu 2004).

Olgugi et pildi-algliikmed ei vaja kalibreerimist, ei tööta nad alati segunemismudelitega. Parimal juhul saame pildi-algliikmeid kasutada, kui pildil on mõni piksel, mis on üleni „puhtast“ aluspinnamaterjalist. Lihtsalt spektraalselt eristuva osa valimine pildilt ei aita ilma mõne naaberpiksliga valimiseta (Adams ja Gillespie 2006).

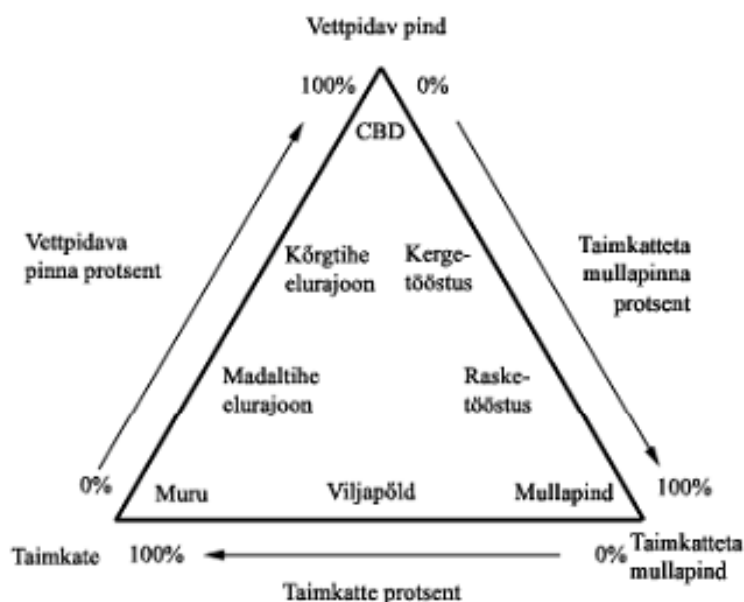
## 1.5 VIS (vegetation – impervious surface – soil) mudel

Üks olulisemaid arendusi linnade uurimises on Riddi (1995) VIS-mudel. See mudel eeldab, et linna maakatte spektraalset signatuuri võib kirjeldada kolme komponendi - taimkate, vettpidav pind, taimkatteta mullapind (*vegetation – impervious surface – soil* ehk VIS) lineaarse kombinatsioonina. Vettpidavad pinnad on inimtekkelised objektid, läbi mille vesi ei saa infiltreeruda maapinda. Nendeks on ehitised, teed, kõnniteed, parklad, katused jne (Lu ja Weng 2006). VIS-mudeli uurimine näitab, et enamikel linlikel elementidel on neile omane



VIS koosseis, mida on raske nn jäikade pikslipõhiste klassifitseerimismeetodite järgi uurida. VIS mudeli peamine eesmärk pole teha kindlaks maakasutuse alasid, vaid kirjeldada maakatte muutusi üle linna keskkonnavalaste muutuste kindlakstegemiseks (Ridd 1995).

Maakasutuse mõiste viitab sellele, milleks seda maad kasutatakse, näiteks kaubanduslikud, tööstus- ja elamute piirkonnad. Maakatte-tüübid näitavad, mis pind tegelikult seda maad katab, näiteks rohi, asfalt, mullapind. VIS-mudel põhineb maakattel. Maakatte ja maakasutuse mõisted ei ole samatähenduslikud. See tähendab, et erinevatel maakasutuse aladel võib olla sama maakatte tüüp ja koosseis. Madala tihedusega elamurajoonid ja linnapark on selle heaks näiteks (Hung 2002). Näiteks võib muru koosneda 90% taimkattest ja 10% mullast; samal ajal koosnevad elumumaad 50% vettpidavast pinnast, 40% taimkattest ja 10% mullast (Setiawan *et al.* 2006).



**Joonis 1.** Mõned näited linna- ja linnalähedastest aladest VIS mudelis (Ridd 1995, joonis eestindatud Kärdi 2007: 14). CBD – central business district ehk äripiirkond.

VIS-mudelis on lahendatud segupikslite probleem ning mudel pakub juhiseid linna maastike keskmise resolutsiooniga piltide analüüsimiseks ühendades need osad spektraalse signatuuriga. Mitmed uuringud (Lu ja Weng 2006, Wu 2004) on võtnud selle mudeli linnakeskkondade mõistmise aluseks. Ward *et al.* (2000) uuringuks oli õpetava valimita hierarhilise skeemi kasutamine nelja osaluspinnatüübi (vesi, mets, lageraie, linn) klassifitseerimiseks pikslipõhiselt ning seda lähenemist rakendati Landsat TM pildil Austraalias Queenslandi osariigis ning põhines VIS-mudelil. Tulemusena saavutati 83% täpsus. Phinn *et al.* (2002) võrdles traditsioonilist pildi klassifitseerimist ja aerofotode tõlgendamist ning kasutati piiratud lineaarset spektrisegu lahutamist Landsat TM pildil Austraalias Queenslandis. Selle uuringu tulemusel leiti, et VIS-osistega pildid, mis olid tuletatud spektrisegu lahutamisest, andsid parema klassifitseerimistulemuse, kui pikslipõhine klassifitseerimine ning aerofotode tõlgendamine. Veel on uuritud (Wu ja Murray 2003)

vettpidava pinna jaotumist USA-s Ohio osariigis, kasutades spektrisegu lahutamist ning leiti, et vettpidavat pinda on võimalik hinnata kasutades madala ja kõrge albeedoga algliikmete lineaarset regressioonimudelit.

Linnamaastike mitmekesisuse mõistmise võtmeks on selle spektraalse eripära teadvustamine. Linna maakatte jagamine kolmeks põhikomponendiks lubab uurida ruumilist heterogeensust ning näitab, kuidas need maakattetüübid erinevad. VIS-mudeliga saab kaugseirepiltide piksleid esitada kolme ökoloogiliselt erineva komponendi kombinatsioonidena: taimkattega pind, vettpidav pind, taimkatteta mullapind. VIS-mudeli puhul jäävad pikslisisesed kolme komponendi väärtused vahemikku 0-100% (joonis 1). Mudel laseb informatsiooni hinnata piksli või selle allosade põhisel ning samuti saab seda kohandada erinevat tüüpi taimkatte, vettpidava pinna ja taimkatteta mullapinna suhtes (Hipple 2006).

Eelnevalt kirjeldatud uuringute andmetel on VIS-mudel olnud kasulik linna maakattemustrite iseloomustamiseks, kuigi selle kasutamine on praktikas teatud määral piiratud. Esiteks ei suuda VIS-mudel selgitada vee ja märgalade maakatte tüüpe. Teiseks ei saa lihtsalt määrata VIS-mudeli vettpidavat pinda algliikmeks kaugseirepiltidel, sest vettpidav pind on keeruline segu erinevatest materjalidest nagu betoon, asfalt, metallid, plastmass (Wu ja Murray 2003). Kolmandaks ei arvesta VIS-mudel varjusid. Kõrgete ehitiste ja puude varjud on oluline tegur, mis mõjutab linnakeskkonna spektraalset mustrit ning peaks olema olulisel kohal linnamaastike analüüsimisel. Keskmise ruumilise lahutusega kaugseire piltidelt on kesklinna, kerge/rasketööstuse, tiheda/keskmise asutusega elurajoonide ja taimkatteta mullapinda traditsiooniliste digitaalpiltide analüüsivõtetega raske eristada. Selleks kasutataksegi spektraalse segu lahutamise meetodit.

## **2. MATERJAL JA METOODIKA**

### **2.1 Uuritavad alad**

#### **2.1.1 Jõhvi**

Jõhvi kujunemine regionaalkeskuseks on järjepidev ajalooline protsess. Alates 13. sajandist on Jõhvi olnud ümbritseva piirkonna kihelkonnakeskus. Esimesed teated Jõhvist kui foogtimõisa keskusest pärinevad 15. sajandist. 1917. aastal anti Jõhvi keskasulale alevi ning 1938. aastal linna õigused. 1960. a likvideeriti Jõhvi linn kui iseseisev haldusüksus ning liideti Kohtla-Järve linnaga. Kohtla-Järve rajooni keskus asus sellele vaatamata endiselt Jõhvis. Koos Eesti Vabariigi taasiseseisvumisega 1991. aastal taastati ka Jõhvi kui iseseisva linna õigused. Praegu on Jõhvi keskuseks Ida-Viru maakonnale. Jõhvi linna ja valla liitumisel 2005. aastal on lihtsustunud Jõhvi kui regionaalkeskuse lähitagamaa edaspidine planeerimine ja kujundamine (Jõhvi valla arengukava 2012). Jõhvi linna pindala on ligikaudu 8 km<sup>2</sup>. Elanike arv viimase rahvaloenduse seisuga on 10 775 inimest (Statistikaamet 2013).

#### **2.1.2 Kohtla-Järve**

Kohtla-Järve linna tekke eelduseks oli 1916. aastal tegevust alustanud põlevkivitööstus, linna õigused sai Kohtla-Järve aga alles 1946. aastal (Reimaa 1996). Kohtla-Järve linna väljakujunemist on oluliselt mõjutanud põlevkivi ulatuslik kasutuselevõtt energeetikas ja keemiatööstuses ning suurte tööstusettevõtete ehitamine linnas. Tööstusettevõtete areng tõi kaasa võõrtööjõu immigratsiooni endistest liiduvabariikidest. Mainitud tegurid on enim mõjutanud Kohtla-Järve linna arengut. Eesti taasiseseisvumisega kaasnenud haldusreform muutis Kohtla-Järve toonaseid piire ning kinnistas linna nüüdsed piirid.

Kohtla-Järve linn koosneb praegu kuuest linnaosast: Järve, Ahtme, Sompa, Oru, Kukruse ja Viivikonna (Kohtla-Järve linna arengukava 2012). Linna administratiivkeskus asub Järve linnaosas. Linn on geograafiliselt väga hajutatud. Samuti on linnaosadevahelised vahemaad Eesti kohta väga suured – nt Järve linnaosast Viivikonnani on umbes 40 kilomeetrit. Kohtla-Järve pindala koos kõigi eraldiseisvate linnaosadega on umbes 42 km<sup>2</sup>, sellest Ahtme linnaosa 10 km<sup>2</sup> ja Järve linnaosa 22 km<sup>2</sup>. Kohtla-Järve linna elanike arv 2011. aasta rahvaloenduse järgi on 37 201 inimest, sh Järve linnaosas 17 054 ja Ahtme linnaosas 17 252 elanikku (Statistikaamet 2013).

#### **2.1.3 Narva**

Narva linn asub Eesti kirdeosas Venemaa piiril. Linn asub Narva jõe vasakul kaldal, 14 km kaugusel selle Soome lahte suubumise kohast, kus asub kuurortlinn Narva-Jõesuu. Narva on Eesti piirilinn. Peale Eesti astumist Euroopa Liitu 2004. aastal sai Narvast Euroopa Liidu piirilinn (Narva linna arengukava 2012).

Narva on sajandeid olnud rahvusvahelise kaubanduse keskus. Viikingite ajast kasutati mööda Narva jõge kulgevat veeteed. Sajandeid hiljem kasutati aktiivselt ka Narvat läbivat maismaateed Tallinnast Novgorodi. Sellel teel, jõe ületuskohal, tekkis XIII sajandil kaubandusasula, mis 14. sajandi keskpaigas sai linna õigused. Tänapäeva Narva on suuruselt

kolmas Eesti linn, oluline kultuuri – ja turismikeskus Eesti idapiiril (Narva turism 2013). Narva linna pindala on 85 km<sup>2</sup>. Narva linna elanike arv viimase rahvaloenduse seisuga on 58 663 inimest (Statistikaamet 2013).

## 2.2 Kasutatud pildid ja tarkvara

Töös on kasutatud Landsat TM satelliidipilte. Nende pildistamise kuupäevad on järgnevad:  
1) Kohtla-Järve ja Jõhvi

25. juuni 1985 (orbiit 186, kaader 19)

8. juuni 2011 (orbiit 187, kaader 18) (USGS Global Visualization Viewer 2013)

2) Narva

2. juuni 1985 (orbiit 185, kaader 19)

19. juuli 2011 (orbiit 186, kaader 18) (USGS Global Visualization Viewer 2013)

Pildid on eelkõige valitud selle järgi, et nendel poleks pilvi ega nähtavat vinet. Teise olulise põhjusena on need ajaliselt valitud seetõttu, et roheliste ja mitteroheliste alade eristamine oleks võimalikult täpne, kuna nendel aegadel on puudel juba lehed. Ajaline resolutsioon on taimkatte jälgimisel ja eristamisel oluline, sest taimkattega pildid muutuvad sesoonselt ja fenoloogiliselt (Weng 2012). Kõige sobivamad pildid selleks on juunikuu pildid, kuid sobis ka 19. juuli 2011 pilt, kuna juulis on kõik veel roheline ning lehtede kolletumine pole alanud. Samuti on töös kasutatud Jõhvi, Kohtla-Järve ja Narva linna ortofotosid, mille pildistamine toimus 21-22.06.2012 (Maa-amet 2012). Pilte vaadati Mapinfo keskkonnas. Taimkattega alade ja vettpidava pinnaga alade eristamiseks kasutati töös Eesti Põhikaardi vektorkujul pindobjektide kihti Kohtla-Järve Järve linnaosast aastast 1999 (Maa-amet 1999) ja Jõhvi ning Ahtme linnaosa puhul aastast 2006 (Maa-amet 2006) ja Narva linna juures aastast 2007 (Maa-amet 2007). Kasutatud kaardilehtede numbrid on lisas 1. Linnade piirid pärinevad asustusüksuse kaardilt seisuga 1.04.2013 (Maa-amet 2013).

Satelliidipiltide töötluks kasutati paketti IDRISI Andes Edition. Põhikaardi töötlusel on kasutatud paketti Mapinfo Professional Version 10.

## 2.3 Metoodika

Linnade linliku keskkonna (ehitised, teed) osakaalu leidmiseks tehti erinevaid tööülesandeid. Töötlust alustati IDRISI programmis. Mooduliga GEOTIFF teisendati satelliidipildid IDRISI jaoks sobivale kujule. Kõik spektri optilise piirkonna pildid, välja arvatud Landsati kuues soojuskanal, teisendati rasterkujule. Kuna pildid olid UTM-35N projektsioonis, tuli kasutada moodulit PROJECT. Nii 1985. aasta pilt kui ka 2011. aasta pilt Jõhvist ja Kohtla-Järvest teisendati Eesti Põhikaardi projektsiooni Lambert-EST ja pilt lõigati suuremast pildist välja nii, et pildivälja mõõtmeteks jäi ligikaudu 14 x 18 km (joonis 2). Piksli suurus maapinnal on 30 m.



**Joonis 2.** Landsat TM 8. juuni 2011 aasta pilt Jõhvi (1) ja nelja Kohtla-Järve linnaosa asendiskeemiga. 2- Järve; 3- Kukuruse; 4- Sompa; 5- Ahtme. Linnapiirid on lisatud vektorjoonisena (valge).

Pildid on tehtud suhteliselt heades tingimustes. 1985. aasta pildil oli õhuke pilveviirg, kuid suuremad linnaalad jäid vinest ja pilvest puutumata. 2011. aasta pildil polnud Jõhvi ja Kohtla-Järve linna ümbruses pilvi ega nähtavat vinet.

Narva pildid teisendati samuti Lambert-EST projektsiooni ja lõigati suuremast pildist välja nii, et pildivälja mõõtmeks jäi 18 x 15 km. Piksli suurus maapinnal on 30 m. Narva linna piirid koos eraldiseisvate aianduspiirkondadega läänes ja loodes on toodud joonisel 3. Suured heledad objektid linna lõunaosas on Balti soojuselektrijaama tuhaväljad. 1985. aasta pildil on Balti soojuselektrijaama suits, kuid pildistamise aegse tuule suuna tõttu kandub see linnast eemale. 2011. aasta pildil on mõned pilved ning on näha ka kerget Balti soojuselektrijaama korstnate suitsu, kuid linnaalad on pildistamise hetkel suitsust ja pilvedest vabad.





**Joonis 3.** Landsat TM 19. juuli 2011 aasta asendipilt Narva linnast. Linnapiirid on lisatud vektorjoonisena (valge).

Järgmisena valiti pildi algliikmeid. Sellega seoses oli varem ka probleem, mis oli seotud erinevate algliikmete maakatte klassisisese spektraalse varieeruvusega. Probleemist üle saamiseks arendas Wu (2004) algliikmete leidmise meetodit edasi normeerides spektraalset andmestikku enne lineaarse spektrisegu meetodi rakendamist ja leidis, et see osutus kasulikuks.

Normeerimist teostati järgneva valemi järgi:

$$\bar{R}_b = \frac{R_b}{\mu} \times 100$$

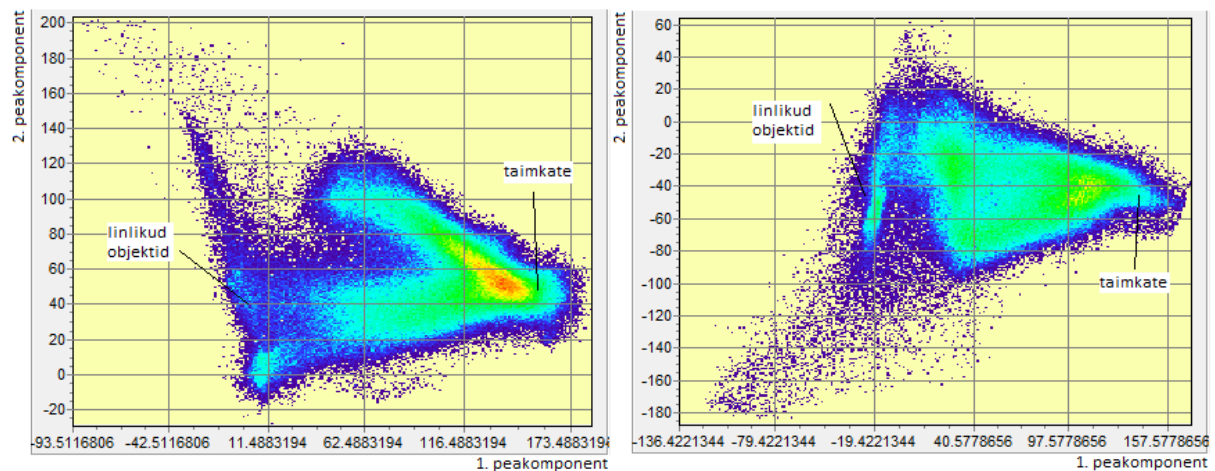
kus

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{b=1}^N R_b$$

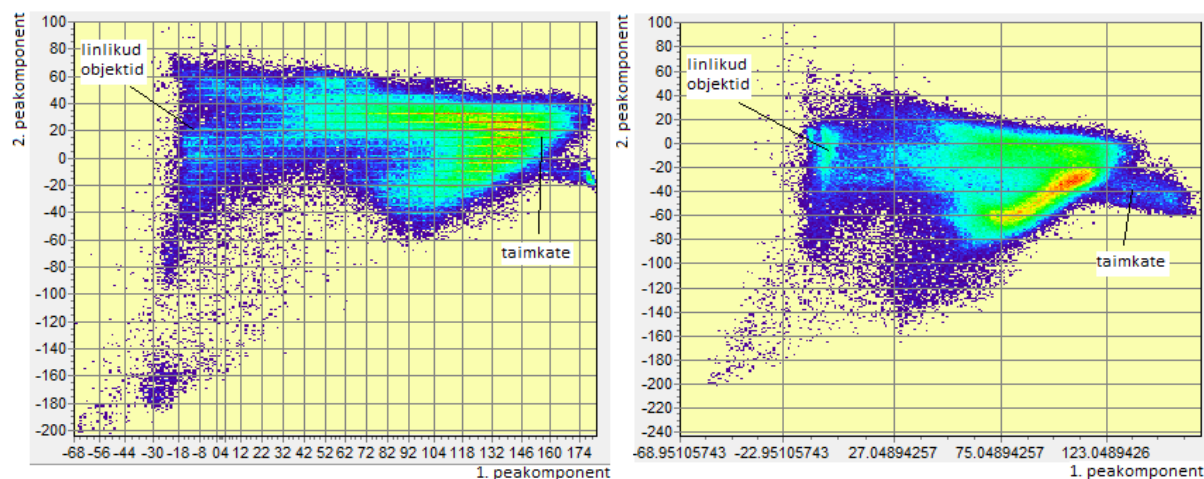
Kus  $\bar{R}_b$  on normeeritud pikslipeegelduvus kanalile  $b$ ;  $R_b$  on algne peegelduvus kanalile  $b$ ;  $\mu$  on keskmine pikslipeegelduvus;  $N$  on kanalite arv (Wu 2004).

Algliikmete signatuuride leidmiseks kasutati IDRISI peakomponentide analüüsi moodulit PCA. Igast Landsat TM erinevatel kuupäevadel pildistatud kuuekanalisest pildist tekitati kuus komponentpilti. Esimesed kolm komponenti kirjeldavad enamiku kaadrite piksliväärtuste varieeruvusest. Kahest komponendist moodustati hajuvusgraafikud. Kuna vesi ei kuulu VIS mudeli komponentide hulka, siis moodustati Narva linna puhul enne PCA analüüsi binaarne maamask. Selleks kasutati varasema ja hilisema aasta lähisinfrapunase kanali pilti. Histogrammide põhjal keskmistati veepindade väärtused ning klassifitseeriti väiksemate väärtustega pikslid nulliks ja suuremad üheks. Kuna vesi linna piires teiste segukomponentidega ei segune, oli mõttekas see välja maskida.

Algliikmete valimise täpsus on oluline. Mooduliga REGRESS esitati graafikuna esimene ja teine komponent, mis kirjeldasid kõige suurema osa pildiandmestiku piksliväärtustest (joonised 4, 5). Algliikmed valiti parvede äärmuspunktide seast, mis kirjeldasid kõige puhtamaid algliikmeid.



**Joonis 4.** 1. ja 2. peakomponendi 1985. aasta hajuvusgraafikud ja algliikmete valimise piirkonnad. Vasakul: Kohtla-Järve ja Jõhvi; paremal: Narva.



**Joonis 5.** 1. ja 2. peakomponendi 2011. aasta hajuvusgraafikud ja algliikmete valimise piirkonnad. Vasakul: Kohtla-Järve ja Jõhvi; paremal: Narva.

Kuna töö eesmärgiks oli uurida linliku keskkonna ja taimkattega pindade paiknemist ja muutust, siis algliikmena mullapinda ei eristatud. Samuti on see tegevus üpris keerukas, sest linliku keskkonna objektidel ja mullapinnal on üpris sarnane peegelduvus (näiteks karjäärid,

tuhamaed ja ehitised). Kuigi spektraalne normeerimisprotsess võib vähendada maakatte spektraalset varieeruvust, kaotab see üpris palju informatsiooni. Näiteks erinevad taimkatte tüübid (männikud, lehtpuistud) jäävad eristamatuks normeeritud spektri puhul, samas on nad nähtavad originaalspektris. Kuid eriti VIS mudeli puhul on olulised ainult kolm maakatte tüüpi – taimkate, vettpidav pind ja mullapind (Wu 2004).

Algliikmete leidmiseks klassifitseeriti (moodul RECLASS) esimese komponendi pilt ümber kaheks algliikmeks – linlik keskkond ja taimkattega pind. Neid algliikmete ümberklassifitseeritud pilte kasutati signatuuride loomisel mooduliga MAKESIG, kus algliikmetele omistati erinevad tunnused. Signatuurid on vajalikud spektraalse segu lahutamise mooduli UNMIX kasutamiseks. UNMIX vajab sisendiks signatuuride rühmafaili ja annab väljundina arvutatud algliikmete fraktsioonide pildid ja modelleerimata jäänud jäägi.

Klassifitseerimistulemuse hindamiseks kasutati IDRISIs mooduliga SAMPLE moodustatud juhuslikult valitud punkte. Nii Kohtla-Järve, Jõhvi kui ka Narva linna pildiväljade aladele tekitati 500 punkti. Jõhvi linna piiresse sattus neid 17, Kohtla-Järve Järve linnaosale 31, Kohtla-Järve Ahtme linnaosale 22 ja Narvale 28. Punkte esindavate rasterpikslite ümber moodustati ühe piksli laiused puhvrid, et laiendada prooviala suurust. Proovilapi suuruseks saadi 90 x 90 m.

Kohtla-Järve linna puhul paigutati punktid kahte suuremasse linnaosasse – Ahtmesse ja Järve linnaosasse. Teisi linnaosasid – Kukruse ja Sompa – mis jäid samuti Landsat kaadri pildivälja piiresse, tulemuste kontrollimiseks ei kasutatud nende väiksuse tõttu.

Narva linnas rakendati punkte ainult nõ linna tuumiku alal. Selleks lõigati linn joonega alates linna piirist mööda raudteed, edasi liiguti mööda Elektriijaama teed ja mööda SEJ sissevoolukanalit mööda Narva veehoidlasse. Eesmärgiks oli teostada veahinnang linlikes piirkondades ja seega jäid välja Balti soojuselektriijaama alad koos tuhaväljadega ning soosalad nendest lõunas. Samuti ei kaasatud veahinnangute arvutustesse suvilaalasid Narva linnast läänes ja loodes.

Spektraalse segu lahutamise tulemuse veahinnanguks kasutati Eesti Põhikaardi pindobjektide andmestikku. Linliku ja roheliste alade eristamiseks jagati Põhikaardi alad kahte klassi – eeldatavalt rohelised alad ja mitterohelised alad ehk ehitised ja teed. Enim tekitasid küsimusi alad nagu „muu lage ja „tootmisõu“. Joonisel 6 on vasakul Eesti Põhikaardi pindobjektide klassifikatsioon ning paremal sama ala ortofotol. Ülemisel pildipaaril on klassifikatsiooni järgi eramajade õued piiritletud „tootmisõuedega“. Neid alasid on linnapiires väga palju. Alumisel pildipaaril on näha, et ala „tootmisõu“ võib olla nii roheline kui ka mitteroheline pind.





**Joonis 6.** Eesti Põhikaardi pindobjektide klassifikatsioon (vasakul) ja sama ala ortofotol (paremal).

Parema täpsuse saamiseks teostati järgnevad ülesanded.

- 1) Esmalt salvestati WMS teenuse vahendusel Mapinfos linnade ortofotod tif-failidena ja imporditi IDRISIsse.
- 2) Pildid kleebiti kokku ja tekitati pildid piksli suurusega 3m.
- 3) Kasutati iteratiivse klasteranalüüsi moodulit ISOCLUST.
- 4) Tulemus jagati kahte klassi – rohelised ja mitterohelised alad.
- 5) Põhikaardilt eraldatud linlikud objektid imporditi IDRISIsse.
- 6) IDRISIsse imporditi ka eelnevalt Põhikaardilt eraldatud alad „muu lage“ ja „tootmisõu“.
- 7) Lõpuks liideti kokku Põhikaardi linlikud objektid ning mooduliga ISOCLUST ja „muu lage“ ning „tootmisõu“ korrigeeritud linlikud alad (edaspidi Põhikaart) (joonis 7, lisa 3).



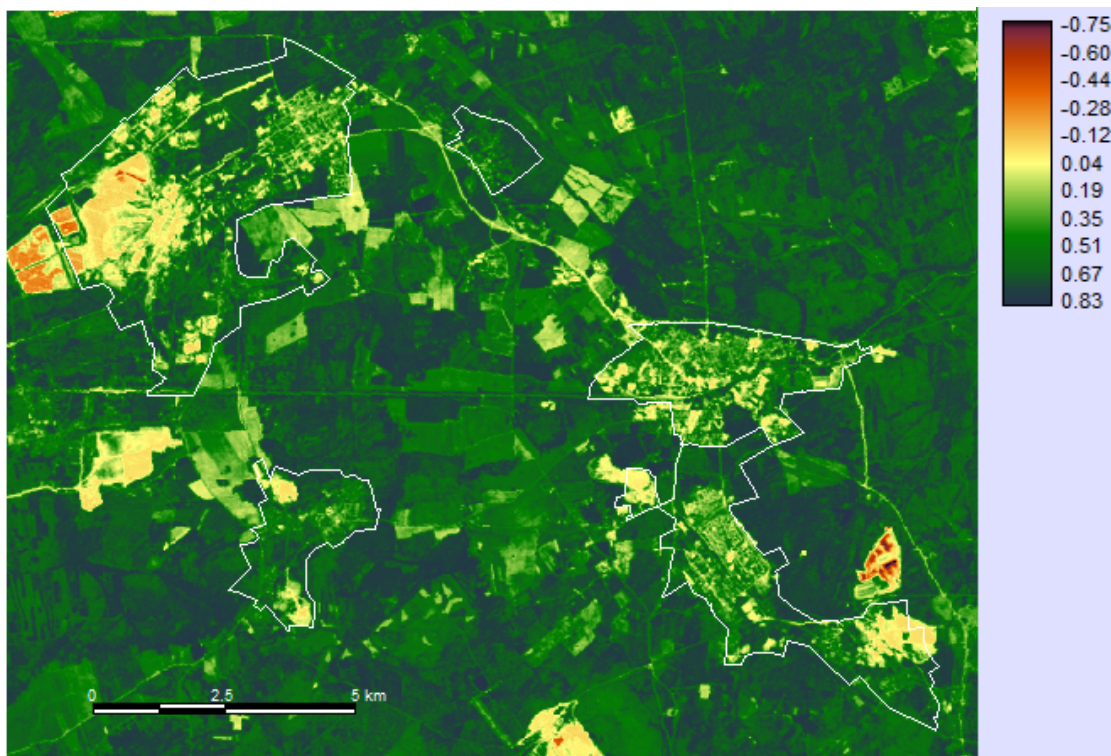
**Joonis 7.** Eesti Põhikaardi ja mooduli ISOCLUST kasutamise tulemusena saadud linliku keskkonda esindavad alad Jõhvi linnas.

Linnades toimunud muutuste hindamiseks lahutati 1985. aasta spektraalse segu lahutamise tulemus 2011. aasta tulemusest. Seejärel kasutati moodulit FILTER ning filtreeriti pilti keskmistava 3x3 suuruse filtriga, et siluda pikslite positsioneerimisest tuleneda võivat suurt variatsiooni tulemusena tekkinud vahepildil. Tulemuste hindamiseks määrati lävend, üle mille on toimunud märkimisväärsed muudatused. Koostati profiiljooned mooduliga PROFILE muutuste jälgimiseks teatud lõigul. Profiiljoonte paigutusel jälgiti, et need läbiksid suuremate muutustega alasid. Profiili põhjal leiti võeti lävendi alapiiriks 0,2 ning seda ületavate alade kohta arvutati pindalalised muutused.

### 3. TULEMUSED JA ARUTELU

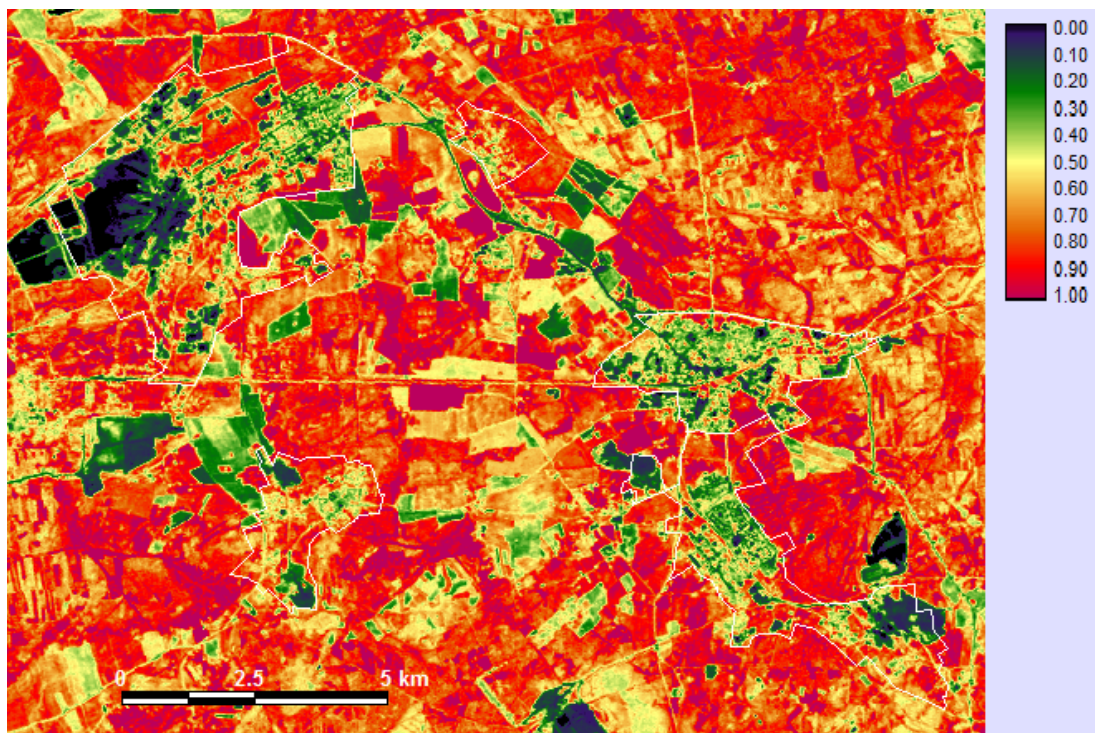
#### 3.1 Spektrisegu lineaarne lahutamine

Algliikmete valimise ja signatuuride koostamise järel kasutati IDRISI keskkonnas moodulit UNMIX. Tulemused on näidatud joonistel 9 ja 10. Varasema aasta tulemused on lisas 4. Mida enam piksli väärtus joonistel 9 ja 10 kujutatud piltidel läheneb ühele, seda rohkem sarnaneb antud ala ühega kahest näidisest, algliikmest. Segu lahutamise tulemus on interpreteeritav niisugusena, et piksliga esindatud ala maapinnal sisaldab samal määral linlikku või taimkattega aluspinda nagu on piksli numbriline väärtus segu lahutamise tulemuse pildil. Võrreldavust silmas pidades on joonisel 8 toodud senises praktikas enam kasutatud ja seetõttu harjumuspärasem vegetatsiooniindeksi NDVI pilt samast alast. Vegetatsiooniindeksi NDVI väärtused on samuti interpreteeritavad kui roheline taimkattega kaetuse numbrilised näitajad.

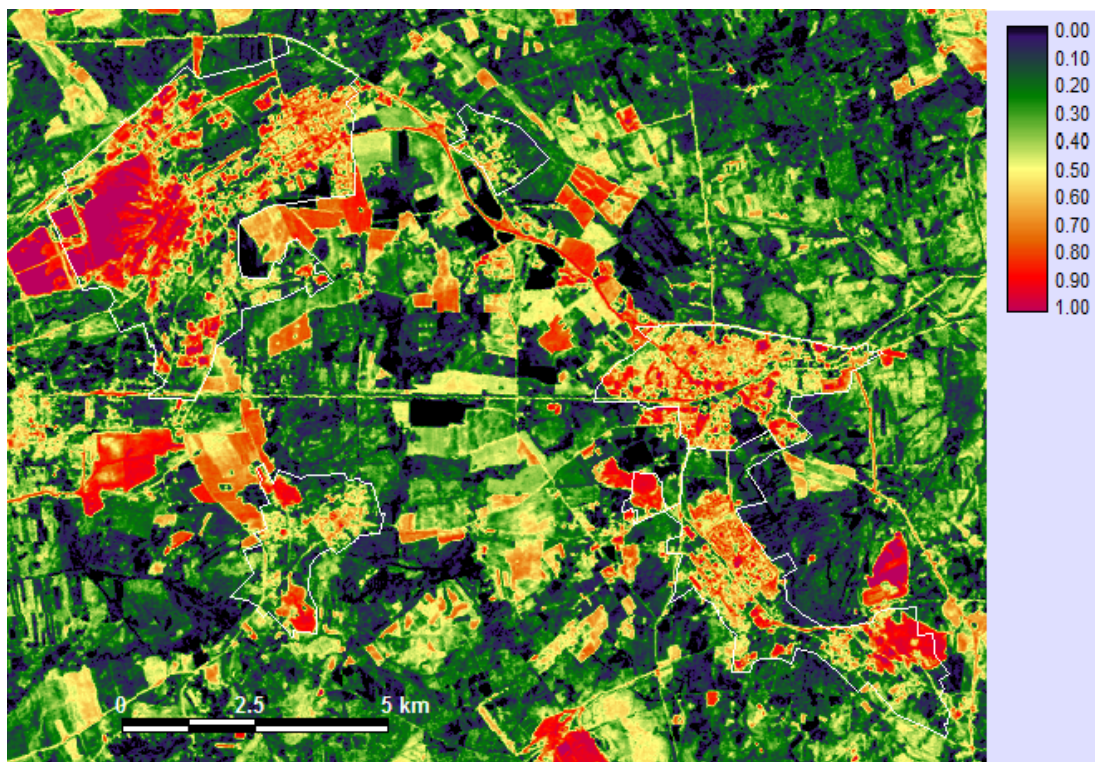


**Joonis 8.** Vegetatsiooniindeksi NDVI pilt Jõhvi ja Kohtla-Järve linnaosadest ning nende ümbrusest.





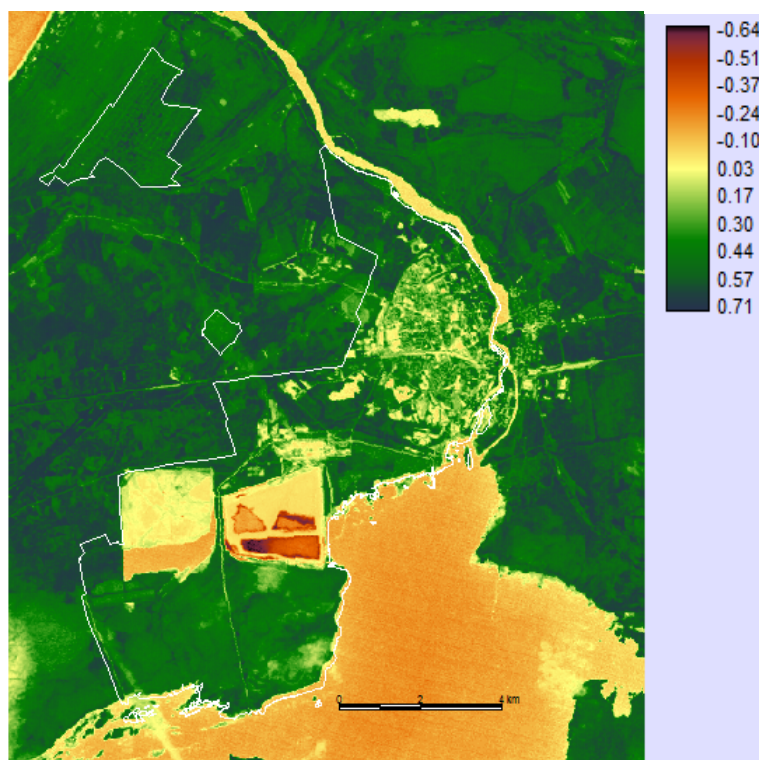
**Joonis 9.** 2011. aasta spektrisegu lahutamise tulemus Jõhvi ja Kohtla-Järve linnaosadest ning nende ümbrusest. Numbrilised väärtused esindavad sarnasust rohelise taimkatte algliikmega pikslites.



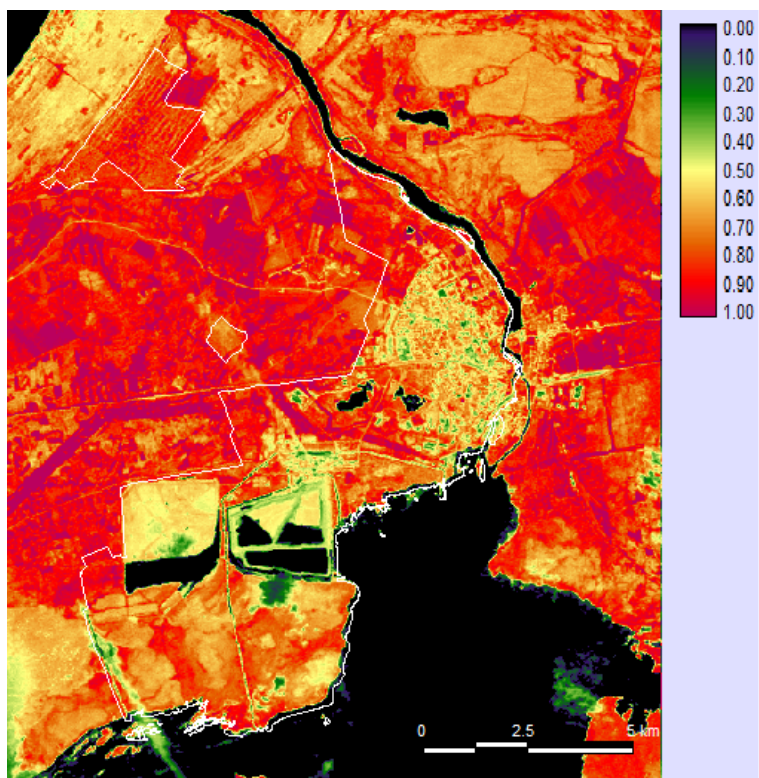
**Joonis 10.** 2011. aasta spektrisegu lahutamise tulemus Jõhvi ja Kohtla-Järve linnaosadest ning nende ümbrusest. Numbrilised väärtused esindavad sarnasust linliku keskkonna algliikmega pikslites.



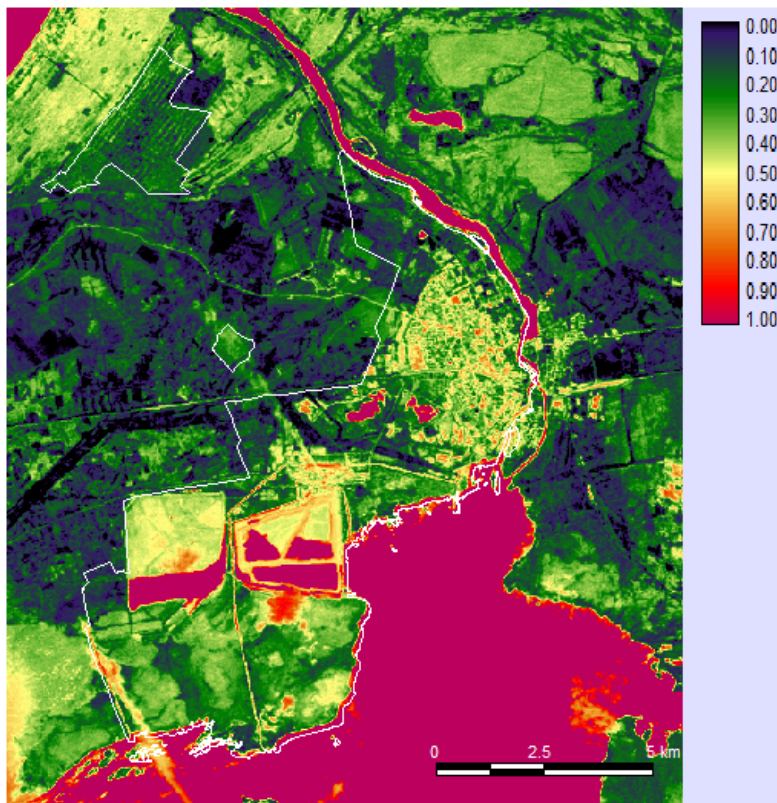
Joonisel 11 on näidatud 2011. aasta NDVI pilti Narva linnast ja selle ümbrusest. Joonistel 12 ja 13 on näidatud spektraalse segu lahutamise tulemused nii linliku keskkonna kui ka taimkattega pindasid arvestavalt Narva ja linna lähiümbruses.



**Joonis 11.** Vegetatsiooniindeksi NDVI pilt Narva linnast ning selle lähiümbrusest.



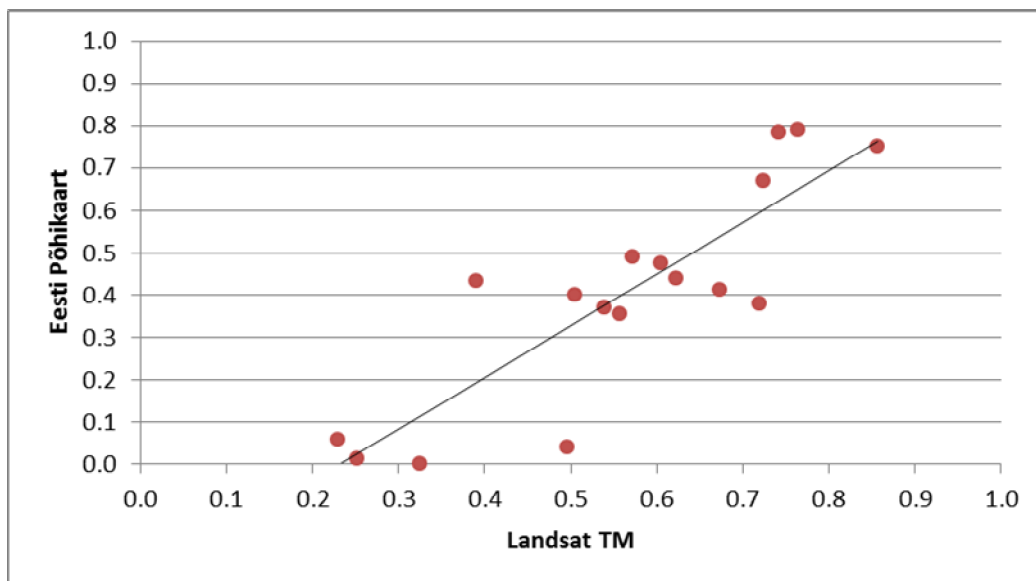
**Joonis 12.** 2011. aasta spektrisegu lahutamise tulemus Narva linnast ning selle lähiümbrusest. Numbrilised väärtused esindavad sarnasust rohelise taimkatte algliikmega pikslites.



**Joonis 13.** 2011. aasta spektrisegu lahutamise tulemus Narva linnast ning selle lähiümbrusest. Numbrilised väärtused esindavad sarnasust linliku keskkonna algliikmega pikslites.

### 3.2 Linliku keskkonna osakaal veahinnangu proovilappides

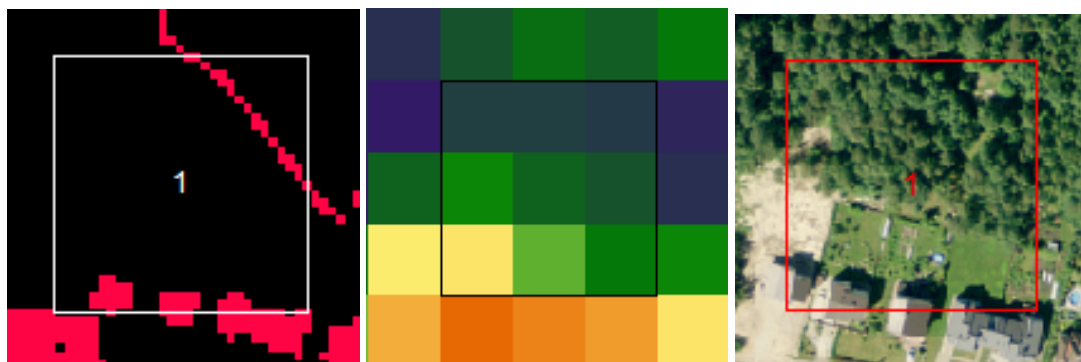
Juhuvalikuga paigutatud prooviruutudes võrreldi Landsat TM pildilt spektraalse segu lahutamise tulemusena ning samadel proovilappidel Eesti Põhikaardi andmestikust arvutatud linliku keskkonna suhtelise osakaalu numbrilisi tulemusi. Kummaski andmestikus leiti pindade suhtelised osakaalud IDRISI keskkonnas mooduliga EXTRACT (lisa 2). Proovilappide sisu visualiseeriti Mapinfo keskkonnas ortofotodega.

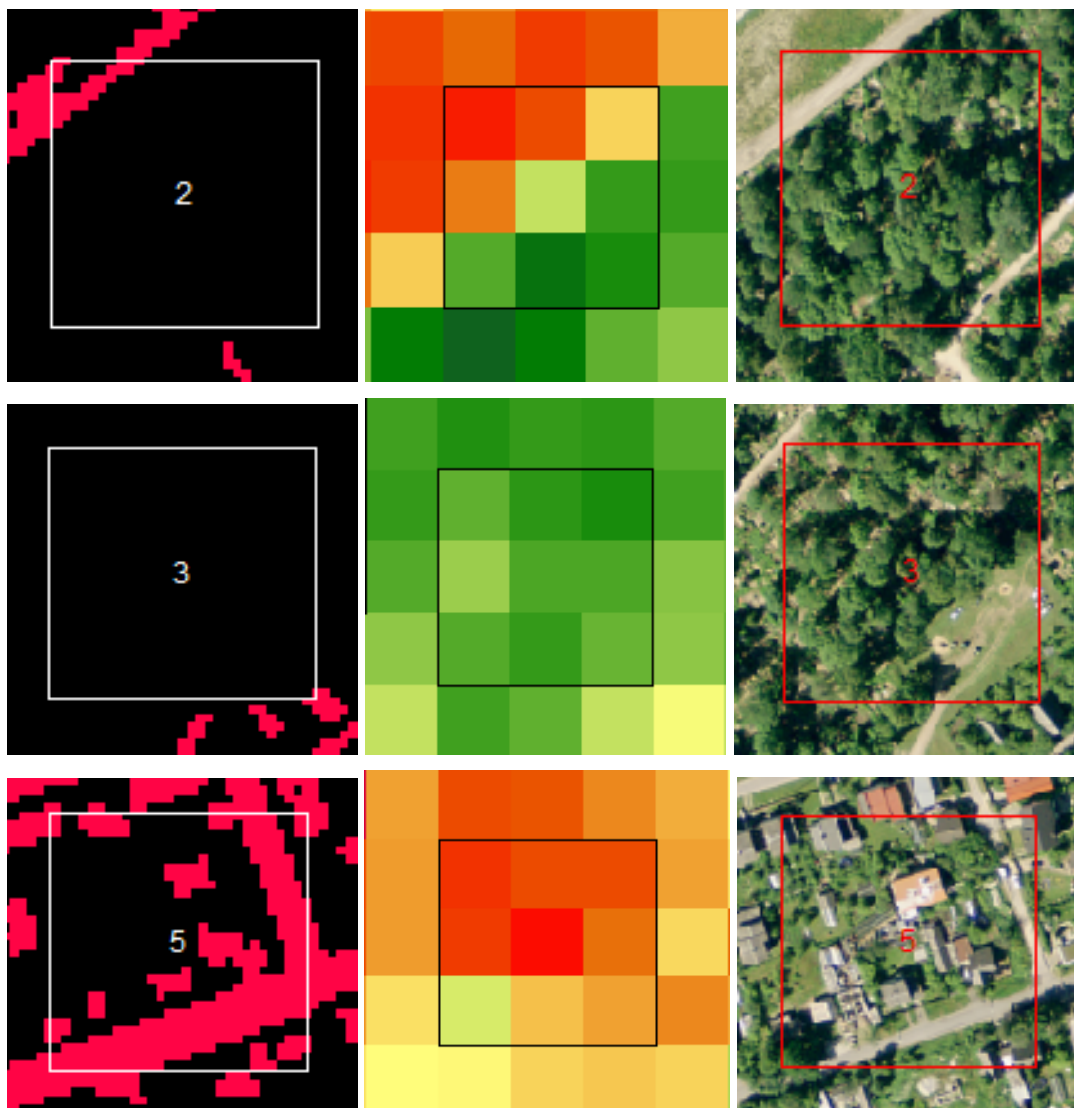


**Joonis 14.** Linlike pindade osakaal Jõhvi linna proovilappide pikslites Eesti Põhikaardil ja Landsat TM pildil spektraalse segu lahutamise tulemusena.

Joonisel 14 on näha linlike pindade osakaalu Jõhvi linna proovilappides Eesti Põhikaardil ja Landsat TM pildil spektraalse segu lahutamise tulemusena. Linlikku keskkonda esindavate pindade osakaalu hinnatakse kahes erinevas andmestikus mõningail juhtudel erinevalt. Järgnevatel joonistel on välja toodud proovilapid, mille piires hinnangud linliku pinna osakaalude proovilapi pikslites on suhteliselt suured. Joonistel on proovilapid kujutatud piltide kolmikuna, millest vasakpoolsemal on Eesti Põhikaardi tulemus, keskmisel spektraalse segu lahutamise tulemus ja paremal sama ala ortofoto väljalõike. Mida punasem on ala joonisel 15 keskmisel pildil, seda rohkem linlikke objekte spektraalse segu lahutamise tulemusena pikslites on. Kasutati IDRISI värvilahendust quant, sama värvilahendus on joonistel 9, 10, 12, 13.

Kõikides esiletoodud proovilappides (joonisel 15) hindab linlikku keskkonda segu lahutamise tulemus Põhikaardil kujutatust üle. Proovilapis nr. 1 arvestab Landsati 30 m piksel ka naaberala segu lahutamise tulemust ning seega hindab linlikku keskkonna osakaalu kõrgemalt. Proovilappides 2 ja 3 on tegemist suhteliselt hõreda taimkattega alaga. See on Jõhvi kalmistu. Seal on segu nii puudest kui ka nende vahel olevatest taimkatteta laikudest. Proovilapis nr. 5 on tegemist eramajade piirkonna proovipunktiga, kus on nii taimkatet kui ka ehitisi. Ortofotoga võrreldes on linliku keskkonna osakaal Landsat-pikslites suurema kaaluga.

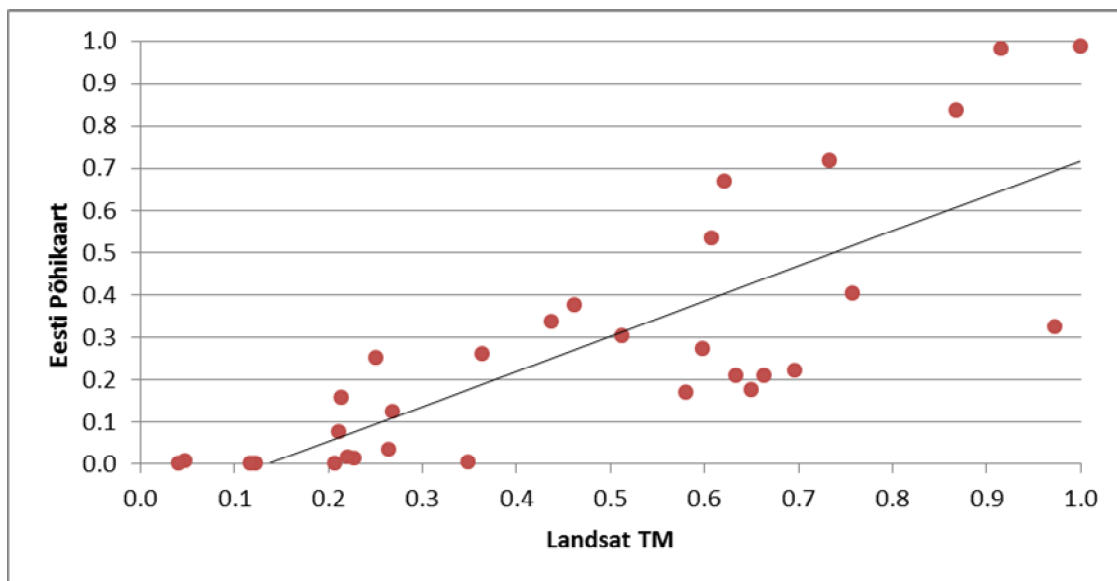




**Joonis 15.** Proovilapid Jõhvi linnas, millest vasakpoolsemal on Eesti Põhikaardi tulemus, keskmisel spektraalse segu lahutamise tulemus ja paremal sama ala ortofoto väljalõikena.

Järgnevalt on välja toodud Kohtla-Järve Järve linnaosas asuvad punktid (joonis 16) ning suuremad erinevused Eesti Põhikaardi ja spektrisegu lahutamise tulemuse vahel (joonis 17).

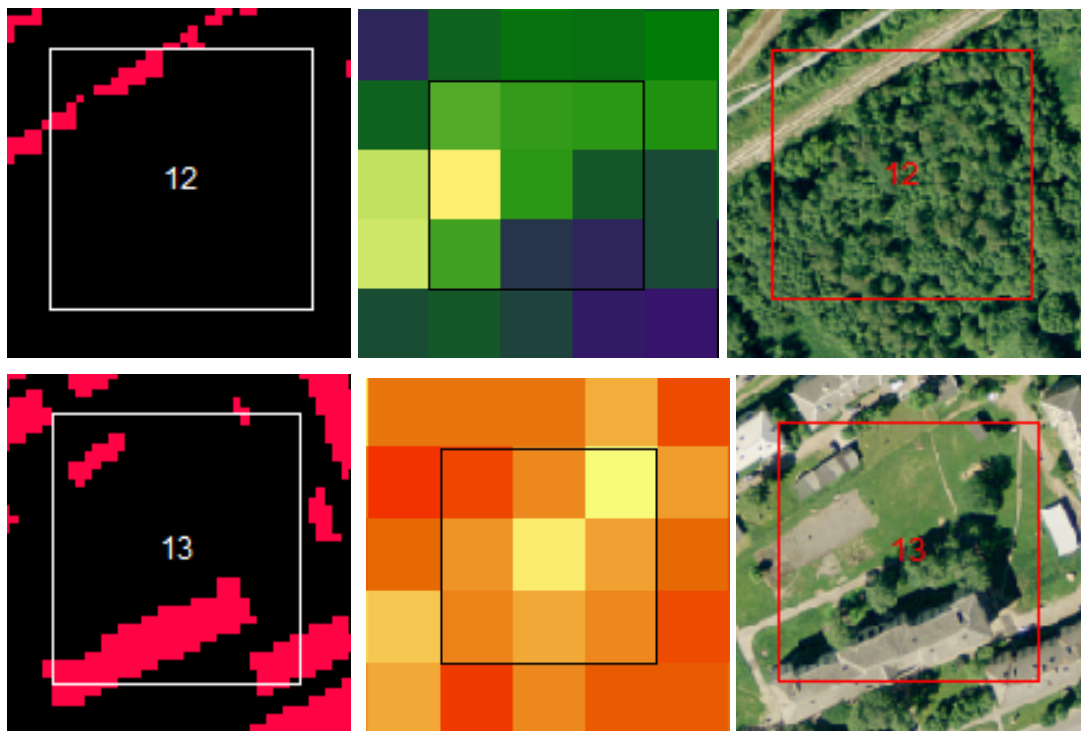


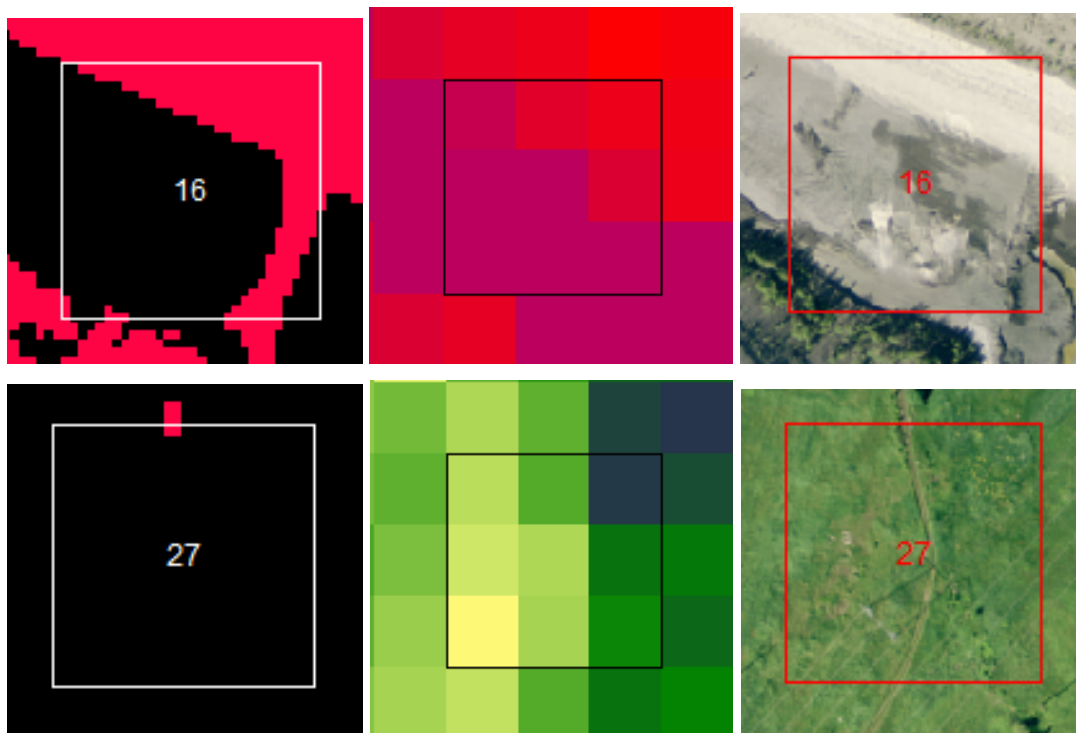


**Joonis 16.** Linlike pindade osakaal Järve linnaosa proovilappides Eesti Põhikaardil ja Landsat TM pildil spektraalse segu lahutamise tulemusena.

Proovilappides 12, 13, 27 (lisa 2) hindab spektraalse segu lahutamise tulemus linliku keskkonna osakaalu Põhikaardil kujutatuga võrreldes üle. Seda eriti proovilapis 13, kus majade vahel asuva roheline ala sees on ka mullapinda, mis heleduselt on sarnane ehitistele.

Proovilapis nr. 16 on linliku keskkonnaga võrreldes eriline objekt. See punkt on sattunud Viru Keemia Grupi (VKG) poolkoksimäele. Landsat hindab seda kui linlikku objekti, sest mullapinda ja ehitisi ning teid on väga raske algliikmeteks eraldi lahutada. Kuna seal punktis pole rohelist alasid, siis satelliidipildi pilditöötamise tulemus hindab linlikku pinda Põhikaardil kujutatust üle.

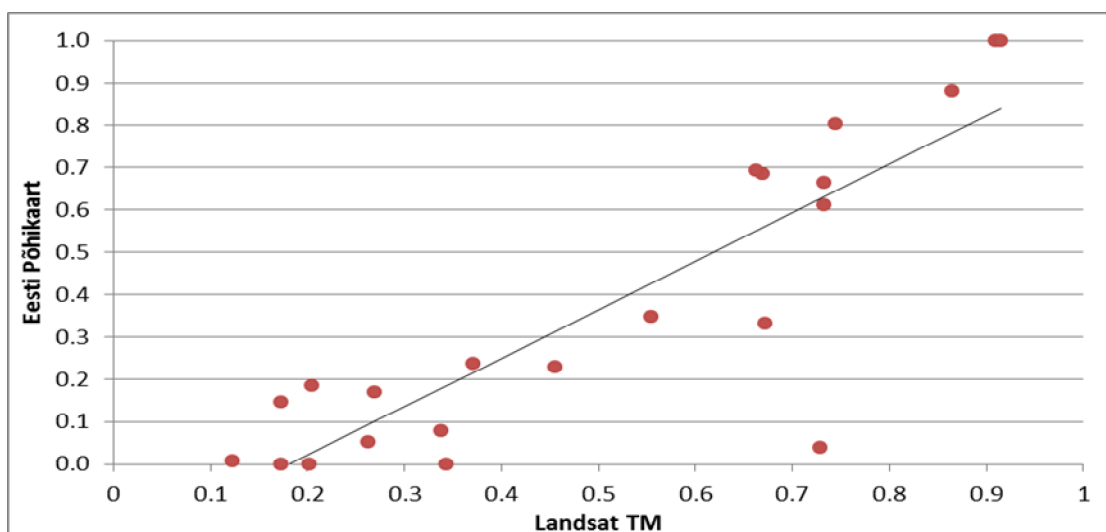




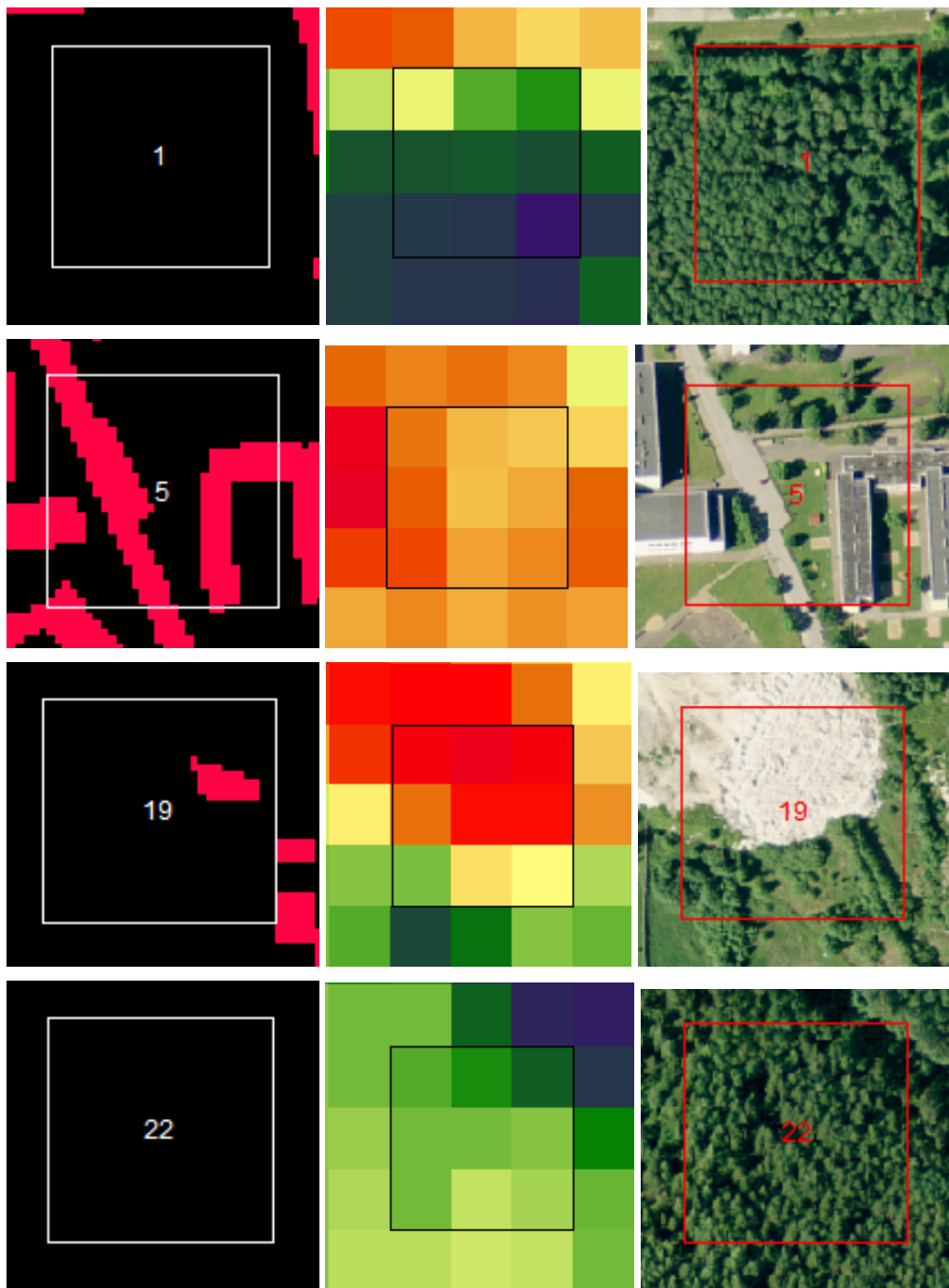
**Joonis 17.** Proovilapid Järve linnaosas, millest vasakpoolsemal on Eesti Põhikaardi tulemus, keskmisel spektraalse segu lahutamise tulemus ja paremal sama ala ortofoto väljalõikena.

Ka Ahtme linnaosas esineb suuremaid erinevusi ning need on toodud joonistel 18 ja 19.

Joonisel 18 näidatud proovilappides hindab spektrisegu lahutamise tulemus linlikku keskkonda Põhikaardist üle. Proovilapis 1 on see tingitud naaberpikslite heledusest. Proovilapis nr. 5 hindavad Landsat-pikslid ortofotoga võrreldes linliku keskkonna osakaalu kõrgemaks. Proovilapis 19 hindab mitterohelist ala Põhikaardist üle spektrisegu lahutamise tulemus. Tegemist on Ahtme soojuselektrijaama juures oleva pinnaga, mis heleduselt on sarnane linliku keskkonnaga. Proovilapis 22 on spektrisegu lahutamise tulemus Põhikaardil kujutatust suurem. Võrreldes ortofotoga tegelikkusest, et Põhikaart antud juhul täpsem.



**Joonis 18.** Linlike pindade osakaal Ahtme linnaosa proovilappides Eesti Põhikaardil ja Landsat TM pildil spektraalse segu lahutamise tulemusena.

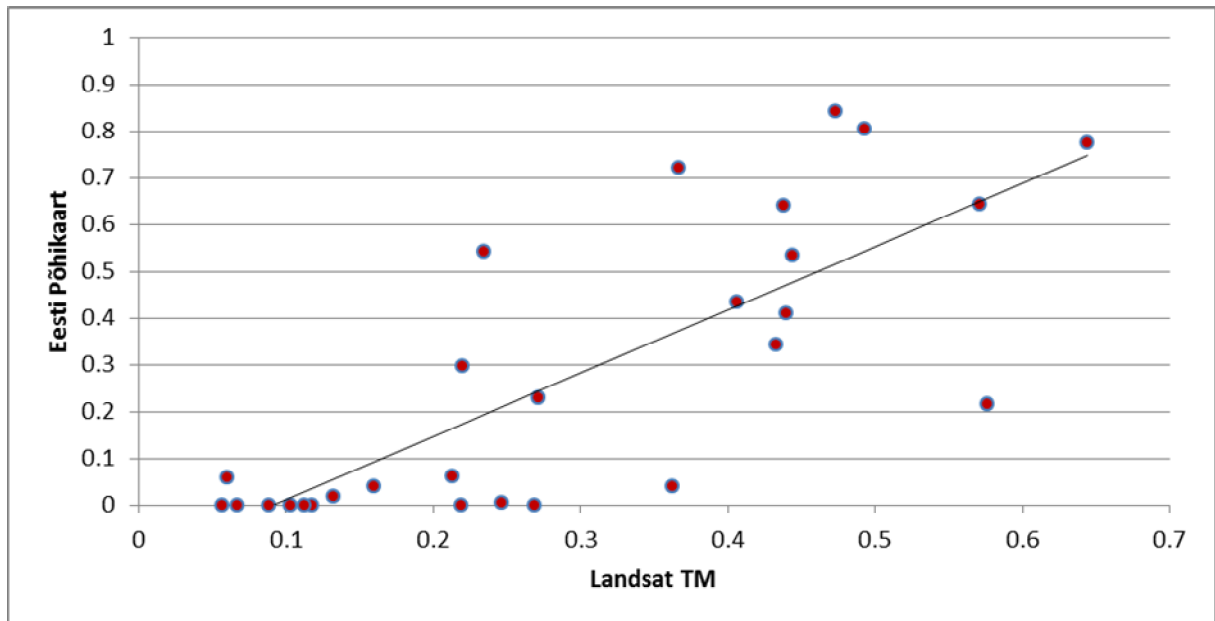


**Joonis 19.** Proovilapid Ahtme linnaosas, millest vasakpoolsemal on Eesti Põhikaardi tulemus, keskmisel spektraalse segu lahutamise tulemus ja paremal sama ala ortofoto väljalõikena.

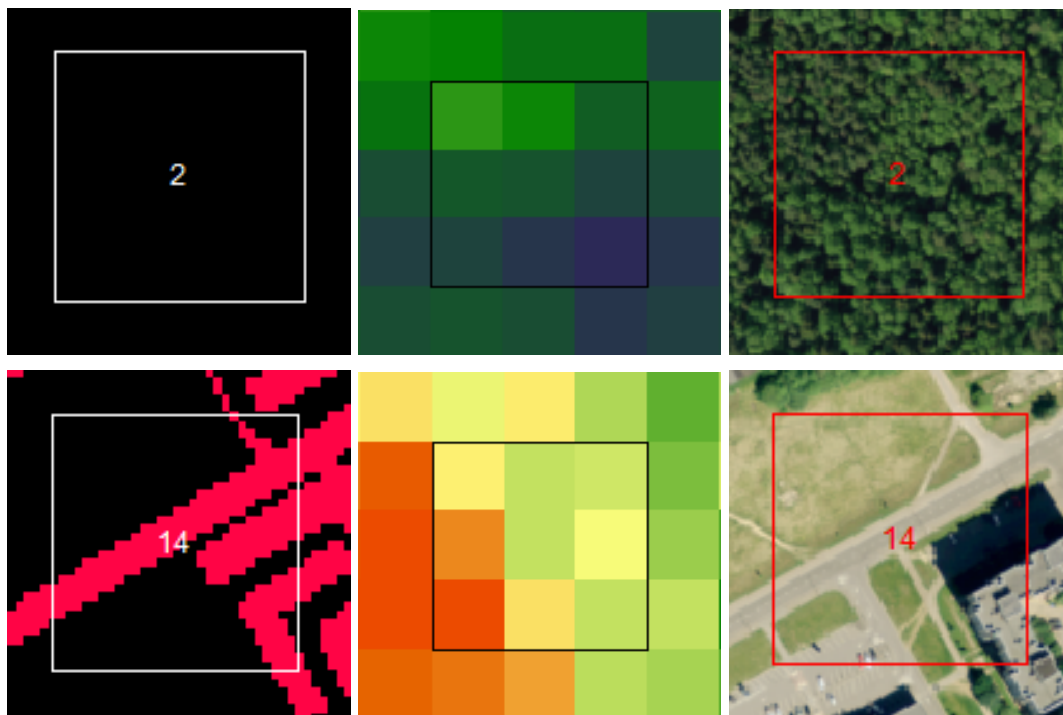
Narva linna proovilappide puhul on täheldatav lineaarse seose lauge tõus. Selle linna puhul on Eesti Põhikaart mõneski punktis hinnanud linlike objektide osakaalu spektrisegu lahutamise tulemusest oluliselt suuremaks. Sellest ka trendijoone tõusunurk. Proovilapid ja suurimad erinevused on välja toodud joonistel 20 ja 21.

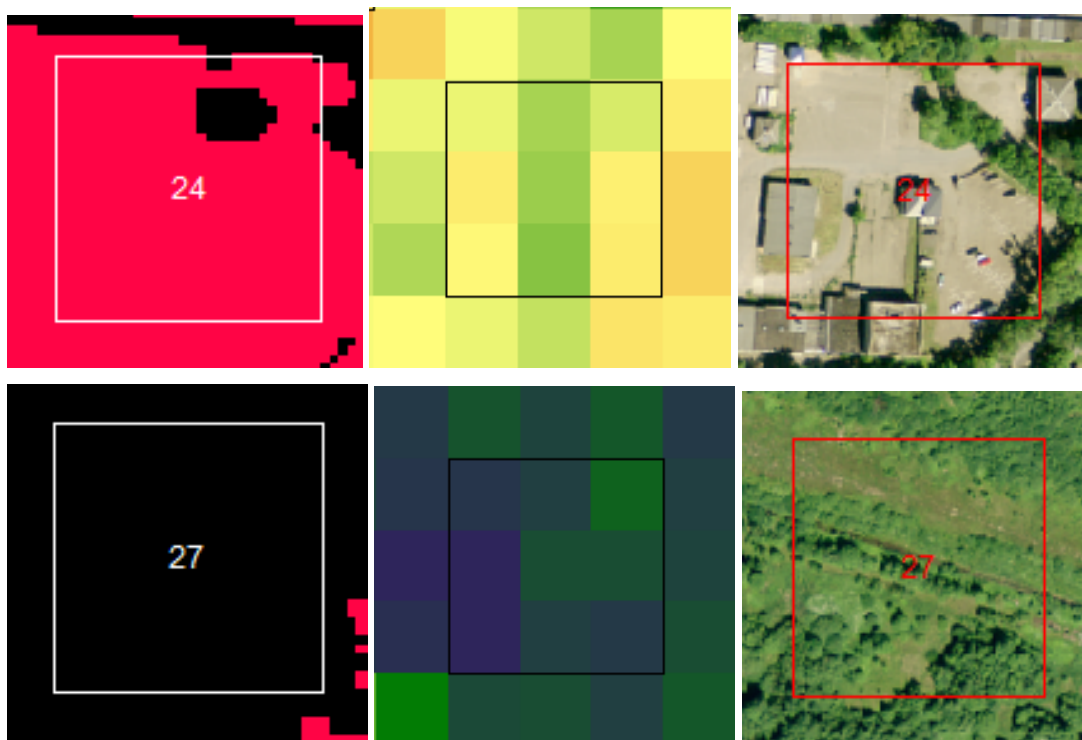
Proovilappides 2 ja 27 peaks tegelikuga võrreldes spektraalse segu lahutamise tulemus olema võimalikult lähedal nullile ehk mitte ühtegi linliku keskkonna objekti. Kuna satelliidipildilt

saadud tulemused on võrreldes Põhikaardiga uuemad, siis proovilapis nr. 14 ei ole Põhikaardil märgitud uue poe – Prisma – asukoht (asfaltplatsi nurk lapi allosas). Proovilapis 24 hindab spektralsegu lahutamise tulemus linlikku keskkonda Põhikaardist alla.



**Joonis 20.** Linlike pindade osakaal Narva linna proovilappides Eesti Põhikaardil ja Landsat TM pildil spektraalsegu lahutamise tulemusena.





**Joonis 21.** Proovilapid Narva linnas, millest vasakpoolsemal on Eesti Põhikaardi tulemus, keskmisel spektraalse segu lahutamise tulemus ja paremal sama ala ortofoto väljalõikenäe.

Spektraalse segu lahutamise tulemust linliku keskkonna aluspinnatüüpide eristamiseks võrreldi Eesti Põhikaardi pindobjektide kihist eristatud linlikku keskkonda esindavate pindadega. Teised uuringud (Small 2001, Wu 2004) kasutasid tulemuste võrdlemiseks ortofotodelt digitud alade võrdlust spektrisegu lahutamise tulemustega. Põhikaardi jaoks aerofotode pildistamine ja digitaalkaardistus on Eesti eri piirkondades toimunud erinevatel aastatel. Seetõttu oli Jõhvi, Narva ja Ahtme linnaosa puhul kättesaadavad ja kasutati töös kõige uuemaid (vastavalt 2006. a ja 2007. a) Põhikaardi versiooni kaardilehti. Kohtla-Järve linnaosa uusimad vektorkujul kaardilehed (64981 ja 64982) ei olnud avalikult kättesaadavad, kuna 2009. aastal pildistatud rannikualasid pole veel avaldatud. Seetõttu on Eesti Põhikaardi situatsioon Järve linnaosa tulemuste kohta vanem kui teiste linnade tulemuste situatsioon. Kui kasutada Põhikaardile ajaliselt lähemal asuvat satelliidipilti, jääks viimastel aastatel toimunud olulised muutused linnades märkamata. Seetõttu on ka ajaline erinevus märgatav Põhikaardi ja satelliidipildi vahel.

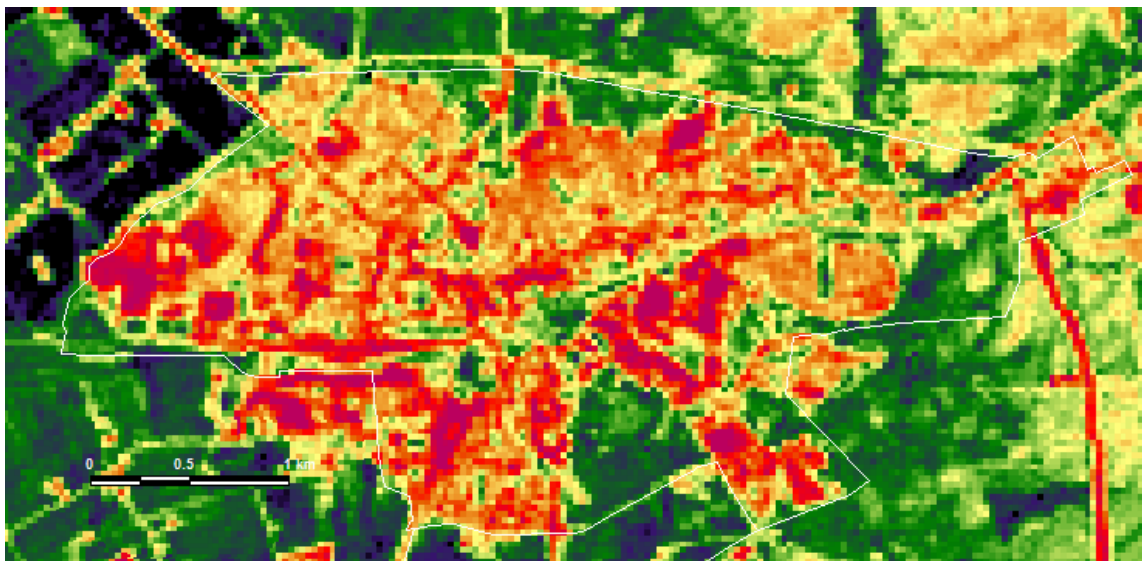
Spektraalse segu lahutamise tulemus sõltub palju algliikmete valikust. Peakomponentide analüüsi tulemusena püüti valida komponentpiltidelt kõige puhtamaid algliikmeid, mis esindaksid hästi linlikku ja rohelist taimkattega ala linnades. Peakomponentide analüüsi kasutas ka Wu (2004) Columbuse linna regioonis. Algliikmete signatuure kasutati lineaarse spektrisegu lahutamise analüüsis. Spektrisegu lahutamine tehti kahe algliikme spektrisegu lahutamiseks. Peatüki joonistel 14, 16, 18 ja 20 on esitatud kahe andmestiku linliku keskkonna osakaalu hinnangud veahinnangu proovilappides.

Graafikusse lisatud lineaarne trendijoon peaks algama telgede alguspunktist ehk väärtusest 0. Kuid aladel, kus Põhikaardi järgi peaks linliku keskkonna osakaal pikslis olema 0, on samas

kohas spektrisegu lahutamise tulemus 0,2 või suurem. Vastava eripära ilmnemisel kontrolliti algliikmeid ning nende linliku keskkonna algliikme valimise piirkonda muudeti konservatiivsemaks ehk prooviti leida veelgi puhtamaid alasid, kuid suurt seose paranemist ei toimunud. Kuna algliikmete valikul kasutati peakomponentide meetodit, siis algliikmete valimise täpsus olenes, kui hästi suudeti eristada puhtaid piksleid. Linnade piires osutusid valituks selgelt eristatavad linliku keskkonna objektid nagu parkimisplatsid ja suuremad ehitised.

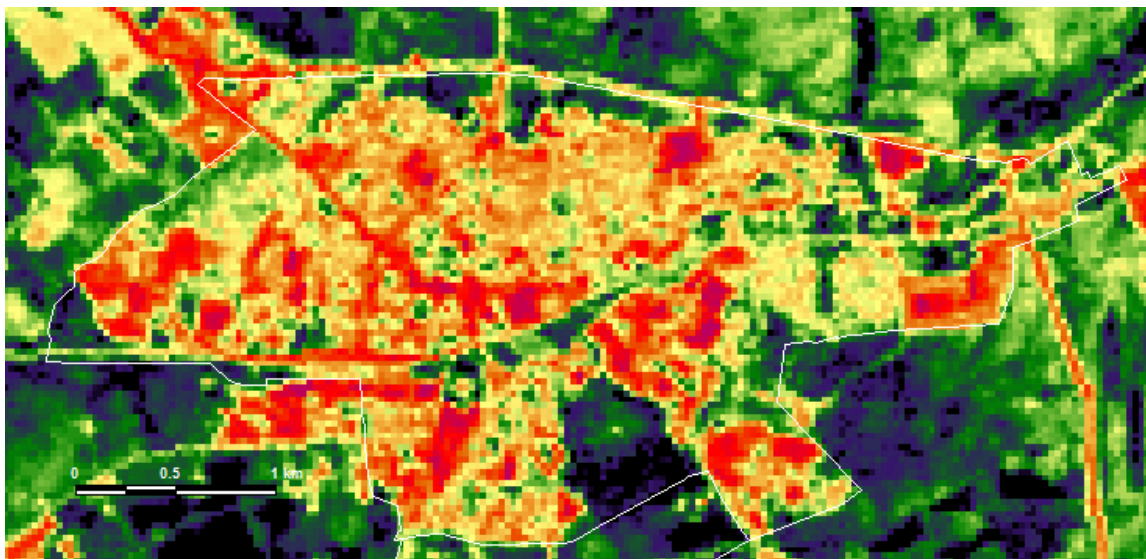
### 3.3 Aastate 1985 kuni 2011 vahemikus linnades toimunud muutused

Aastate 1985 kuni 2011 lõikes Ida-Virumaa linnades toimunud muutusi esitatakse joonistel 22 kuni 24 Jõhvi linna näitel. Joonisel 22 on 1985. aasta pilt, joonisel 23 2011. aasta pilt spektraalse segu linliku keskkonna lahutamise tulemusest (värvilahendus quant). Joonisel 24 on kahe kummagi aasta segu lahutamise aritmeetilise vahe pilt. Pildil kasutati keskmistavat 3x3 suurusega filtrit. Mida punakamad on alad, seda suuremad muutused on toimunud. Olulisemate muutuste hindamiseks valiti piksli väärtusena lävendiks 0,2. Lävendit ületavate alade kaart Jõhvi kohta on toodud joonisel 25.

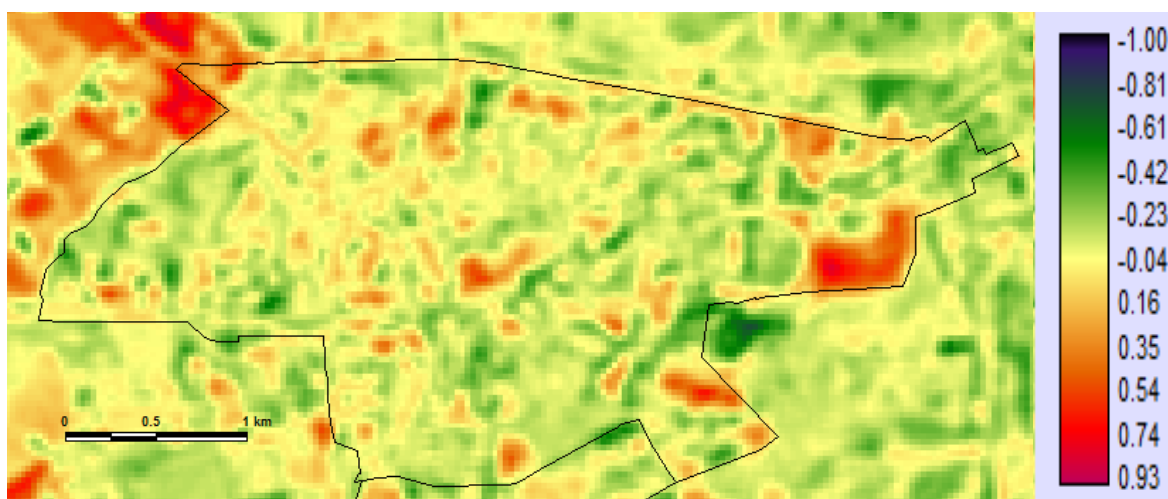


**Joonis 22.** Jõhvi linna 1985. aasta linliku pinna spektraalse segu lahutamise tulemus.

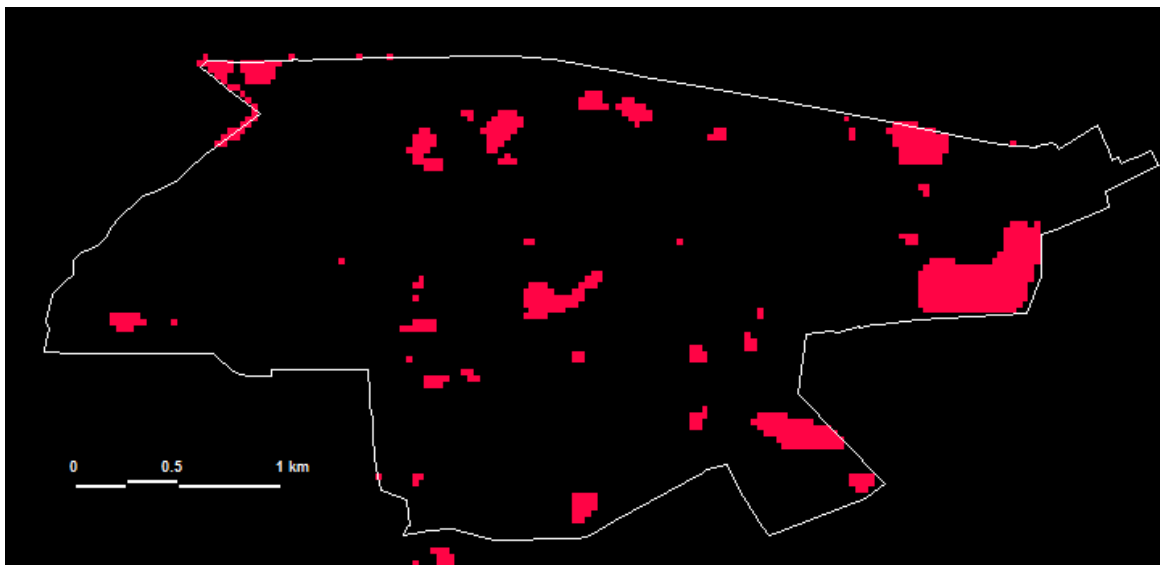




**Joonis 23.** Jõhvi linna 2011. aasta linliku pinna spektraalse segu lahutamise tulemus.



**Joonis 24.** Jõhvi linnas aastate 1985 kuni 2011 vahemikus pikslite linliku keskkonna osakaaludes toimunud muutused.



**Joonis 25.** Jõhvi linnas aastate 1985 kuni 2011 vahemikus pikslite linlikus keskkonna osakaaludes lävendit 0,2 ületavate muutuste alad.

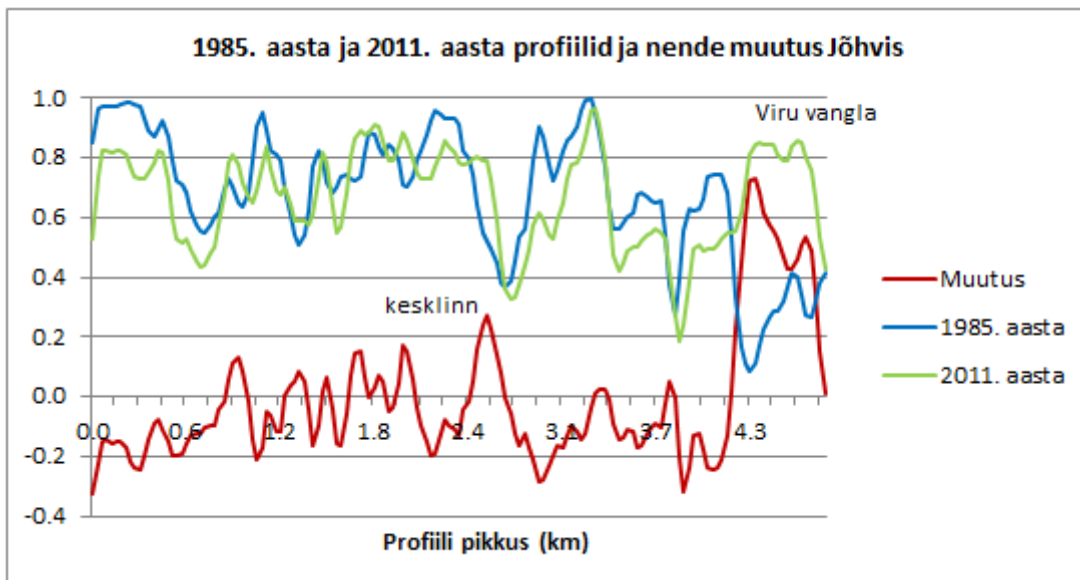
Kohtla-Järve ja Narva linnade samasisulised joonised on lisades 5 ja 6. Tabelis 1 on toodud kõigi töös käsitletud linnade ja linnaosade 0,2 ületavate pikslite pindalalised muutused 26-aastase perioodi jooksul. Kõige väiksem lävendit ületav muutus pindalalt on Narva linnas. Kõige suurem aga Järve linnaosas. Muutuse protsent võrreldes linna pindalaga on kõige suurem Jõhvis, väiksem Narvas.

**Tabel 1.** Linliku keskkonna osakaaludes lävendit 0,2 ületavate muutuste pindala Ida-Virumaa linnades hektarites aastate 1985 ja 2011 piltide võrdluses.

	Muutus (ha)	Linna pindala (ha)	Muutuse %
Jõhvi linn	55 ha	800 ha	6.88
Ahtme linnaosa	62 ha	1000 ha	6.20
Järve linnaosa	145 ha	2200 ha	6.59
Narva linn	26 ha	8500 ha	0.31

Linnades toimunud muutuste illustreerimiseks teatud lõigul koostati profiiljooned (lisa 5). Kuna profiili läbilõike valikuks olid suurema muutusega alad linnas, siis varasema ja hilisema aasta spektraalse segu tulemuste lahutamise järel olid linnades näha piirkonnad, kus linliku keskkonna muutused olid kõige märgatavamad. Joonisel 26 on Jõhvi linna profiiljoone linlike pindade osakaalud profiiljoonel nii 1985. aasta kui ka 2011. aasta spektraalse segu lahutamise pildil, graafikul on ka piltide pildistamise ajavahemikus toimunud muutused profiiljoonena vahepildil.





**Joonis 26.** Linlike pindade osakaalud profiiljoonel Jõhvis 1985. a ja 2011. a spektraalse segu lahutamise piltidel ning piltide pildistamise ajavahemikus toimunud muutused profiiljoonena vahepildil. Suuremate muutustega alad on graafikul märgenditena.

Jõhvi puhul läbis profiiljoon kesklinna muutustega ala. Vaadates Jõhvi kesklinna piirkonda 1996. aasta ortofotol ja 2012. aasta ortofotol (joonis 27, 28), on antud piirkonnas väga palju muutunud. Ehitatud on uusi kaubanduskeskusi ja renoveeritud vanu, muudetud on teedelasid. Kõige suurem muutus on toimunud linna äärealal, kuhu ehitati Viru vangla (joonis 29), mis valmis aastal 2008.



**Joonis 27.** Jõhvi kesklinn 1996. aasta ortofoto väljalõikel

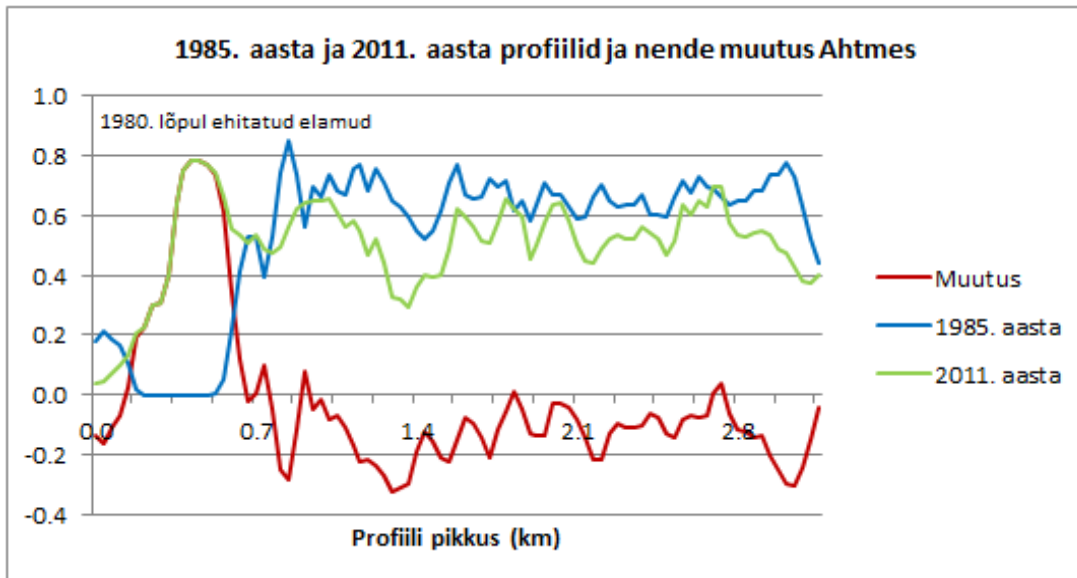


**Joonis 28.** Jõhvi kesklinn 2012. aasta ortofoto väljalõikel



**Joonis 29.** Viru vangla 2012. aasta ortofoto väljalõikel

Joonisel 30 on Ahtme linnaosa profiiljoone läbilõige nii 1985. aasta kui ka 2011. aasta spektraalse segu lahutamise pildilt ning kahe pildi vaheline muutus. Samuti on märgitud suuremate muutustega alad.



**Joonis 30.** Linlike pindade osakaalud profiiljoonel Ahtmes 1985. a ja 2011. a spektraalse segu lahutamise pildidel ning piltide pildistamise ajavahemikus toimunud muutused profiiljoonena vahepildil. Suuremate muutustega alad on graafikul märgenditena.

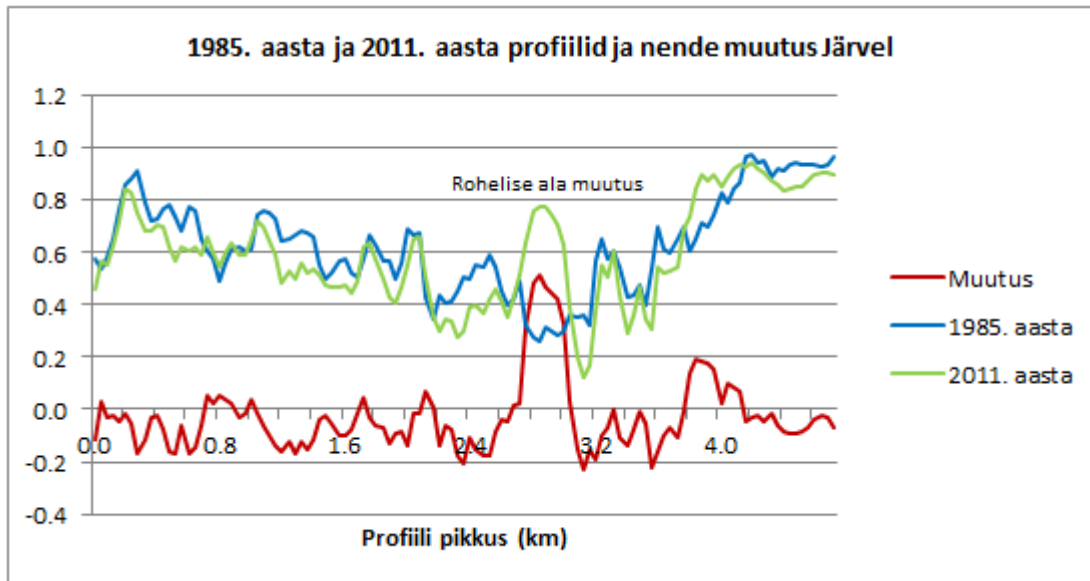
Ahtme puhul läbis profiiljoon nn 32. rajooni ja Uus-Ahtme piirkonda. Kõige suurem muutus antud piirkonnas on 1980. aastate lõpus ehitama hakatud 32. rajooni Jõhvi poolsem piirkond (joonis 31). Rajooni ja Jõhvi vaheline ala oli plaanis täis ehitada (Kirss 1980), kuid riigikorra muutumise järel seda ei tehtud (Vello Erik, suulised andmed). Hetkel asub seal peamiselt viiekordsete majade rajoon.



**Joonis 31.** Ahtme kõige uuema piirkonna väljalõige 2012. aasta ortofotol.

Joonisel 32 on Järve linnaosa profiiljoone läbilõige nii 1985. aasta kui ka 2011. aasta spektraalse segu lahutamise pildilt ning kahe pildi vaheline muutus. Ka on märgitud suuremate muutustega alad.





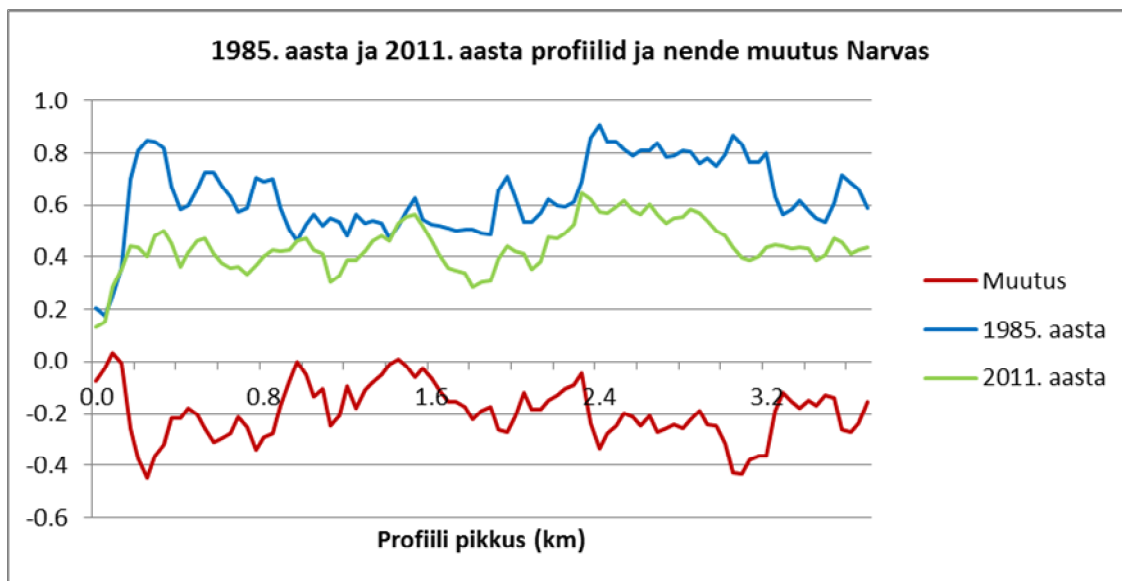
**Joonis 32.** Linlike pindade osakaalud profiiljoonel Järvel 1985. a ja 2011. a spektraalse segu lahutamise piltidel ning piltide pildistamise ajavahemikus toimunud muutused profiiljoonena vahepildil. Suuremate muutustega alad on graafikul märgenditena.

Järve puhul läbis profiiljoon 1950. aastatel ehitama hakatud (Kirss 1980) ja veidi hiljem valminud Põhjamikrorajooni ning vanalinna. Kõige suurem muutus antud transektil ilmnes vanalinnas linna jäähalli ja staadioni aladel. Kuna linna suuremahulised pargi korrastustööd toimusid 2011. aastal, siis joonisel 33 on näha taimkattega alade muutust.



**Joonis 33.** Järve linnaosa pargiala jäähalli ja staadioniga 1996. aasta (vasakul) ja 2012. aasta (paremal) ortofoto väljalõikel.

Narva linna profiiljoone läbilõige nii 1985. aasta kui ka 2011. aasta spektraalse segu lahutamise pildilt ning kahe pildi vaheline muutus on toodud joonisel 34. Profiiliga kujutatud läbilõige linnast ei näita lävendit ületavaid muutusi.



**Joonis 34.** Linlike pindade osakaalud profiiljoonel Narvas 1985. a ja 2011. a spektraalse segu lahutamise piltidel ning piltide pildistamise ajavahemikus toimunud muutused profiiljoonena vahepildil. Suuremate muutustega alad on graafikul märgenditena.

Narva linnas kulges profiiljoon loode-kagu suunal. Sinna jäid elamute piirkonnad, mis on ehitatud kõige hiljem, 1970. aastate lõpus, kesklinna osa, mille ehitusaeg on 1970. aastate algus ning ka Kreenholmi piirkonna osa. Seetõttu olid antud hoonestusalad 1985. aasta Landsat TM kaadril juba olemas ning muutust 2011. aastaga võrreldes ei täheldatud.

Küll aga on toimunud muutusi Narva põhjapoolsemas osas Kangelaste prospekti ääres. Seal on 1980. aastate lõpus ehitatud mitmekorruselised kortermajad ning kesklinna poole liikudes suur Prisma kaubanduskeskus.



**Joonis 35.** Narva linna põhjapoolsemad muutused 2012. aasta ortofoto väljalõikel. Kesklinna suund on näidatud noolega.

## KOKKUVÕTE

Linnakeskkond on väga mitmekesine nii maastiku kui ka linnaelanike paiknemise osas. Selline heterogeensus esitab kaugseirevahenditele ja -meetoditele spetsiifilisi nõudmisi. Linnastumise kasvutrendi jätkumisel on rahvastiku koondumist ja sellega seotud maakattemuutusi aina keerulisem hinnata. Rahvastiku kontsentreerumisega süvenevad ka keskkonnaprobleemid, näiteks õhu ja vee kvaliteedi langus, kuid kaugseire erinevad meetodid võivad aidata neid probleeme jälgida ning kaardistada ning sobivate andmete korral saab nende põhjal murekohtadele lahendusi leida.

Töö eesmärgiks oli uurida Ida-Virumaa linnades aastate 1985 ja 2011 vahemikus toimunud muutusi. Töös käsitleti Jõhvi, Kohtla-Järve ja Narva linnasid. Linnade eripära tõttu on jäikade klassifitseerimisalgoritmide kasutamine keskmise ruumilise lahutusega satelliidipildidel raskendatud, sest üks piksel võib esindada erinevaid maakattetüüpe. Seetõttu kasutati töös aja jooksul toimunud muutuste mõõtmiseks Landsat TM satelliidipildidel spektrisegu lineaarset lahutamist, kuna tulemusena lubatakse ühele pikslile mitmest klassikuuluvust.

Algliikmete valikul lähtuti VIS (*vegetation- impervious surface- soil*) mudelist, mille kohaselt koosneb piksel kolmest maakattekomponendist (taimkate, vettpidav pind ja mullapind) ning nende vahelisest suhtest pikslis. Algliikmed leiti peakomponentide analüüsi teel. Enne algliikmete leidmist normeeriti spektraalkanalite pildid, et vähendada heleduse varieeruvusest tingitud viga.

Landsat TM satelliidipildidelt saadud spektraalse segu lahutamise tulemusi võrreldi Eesti Põhikaardiga. Põhikaardi klassid klassifitseeriti kaheks klassiks – roheline ja mitteroheline. Veahinnangut teostati kaardile paigutatud juhuslikes proovilappides. Tulemused olid linnade lõikes erinevad, mõnikord hindas Landsat TM linliku keskkonna tulemust proovilappides Põhikaardist üle, teinekord sellest väiksemaks.

Linnades toimunud muutuste leidmiseks lahutati 2011. aasta spektrisegu lahutamise pilt 1985. aastast. Suuremate muutuste leidmiseks seati lävend, üle mille arvutati muutunud alade pindala. Kõige rohkem muutusi linliku keskkonna pindalas täheldati Kohtla-Järve Järve linnaosas, väiksemad olid erinevused Narvas.

Magistritöö tulemused sõltuvad kõige enam algliikmete valikust. Kindlasti peab valima võimalikult puhtad maakatteklasside esindajad, sest segupikslite korral võivad tulemused tegelikkusest väga erinevaks osutuda. Üldiselt võib saadud tulemustega rahul olla ning kui pidada Eesti Põhikaarti õigeks aluseks, millel kujutatut Landsat TM satelliidipildi klassifitseerimistulemusega võrrelda, võib satelliidipilti lugeda päris täpseks. Tulemused sõltuvad ka sellest, kui suur on ajaline vahe kahe andmestiku, Eesti Põhikaardi ja satelliidipildi vahel.

Satelliidi Landsat TM pildi võrdluses Eesti Põhikaardi pindobjektidega selgub, et kuigi Landsat TM sensori ruumiline resolutsioon on liiga suur linna infrastruktuuri jälgimiseks, on see piisav märkimisväärsete ruumilise ja ajalise varieeruvuse kindlakstegemisel linna taimkattes ja linliku keskkonnas.

## SUMMARY

### **Changes in the urban areas of the Ida-Viru county with spectral mixture analysis tools**

Every urban environment is very versatile both in relation to its location of landscape as well as the population. This kind of heterogeneity presents demands on the devices of remote sensing and the methods used. In the occurrence of a rising trend in urbanisation it is ever more difficult to assess the converging of the populace and changes in the landcovers. With the concentration of the populace the environmental problems also deepen, for example a decrease in the quality of air and water, but various methods of remote sensing can help in observing and mapping these problems, and in case of suitable data, it is possible to find solutions to the troubling areas.

The purpose of the present paper was to study the changes that have taken place in the towns of Ida-Virumaa between the years 1985 and 2011. The work handled the towns of Jõhvi, Kohtla-Järve and Narva. Due to the special features of the towns, using hard classifiers on satellite pictures with an medium resolution data is made difficult, because one pixel can comprise various types of landcovers. Because of this, the given study used linear spectral unmixing with Landsat TM satellite pictures to determine the changes that have taken place over time.

The VIS (vegetation- impervious surface- soil) model, according to what a pixel consists of three landcover components and their relationship in pixels, was used in choosing the endmembers. The endmembers were found by principal components analysis. Before finding the endmembers, the images of the spectral channels were normalized in order to minimise the mistake conditioned by the distribution of the brightness.

The results found in linear spectral unmixing of the Landsat TM satellite picture were compared to the Estonian Basic Map. The subclasses of the Basic Map were reclassified into two classes – green and not green. Accuracy assessment was carried out on random sample patches. The results varied across the towns, sometimes Landsat TM evaluated the urban environment's result in the sample patches as higher than in the Basic Map, other times as lower.

To find out about the changes that have taken place in the towns, the spectral unmixing image from the year 2011 was subtracted from the one from the year 1985. To find out about bigger changes, a threshold was set up with what the surface area of the changed area was evaluated. Järve, a borough of Kohtla-Järve, had the most changes in the surface area of urban environment, Narva had smaller differences.

The results of the study depend foremost on the choice of endmembers. It is important to choose as pure representatives of landcover classes as possible, because with mixed pixels the results can turn out to be very different from the real situation. The results are generally satisfactory, and when considering the Estonian Basic Map as an accurate basis on what to compare the Landsat TM satellite picture with the qualifying result, the satellite picture can be held as fairly accurate. The results depend also on how large is the temporal difference between the two datasets - Estonian Basic Map and the satellite picture.

In comparing the picture of the satellite Landsat TM with the surface object, it turns out that although the spatial resolution of the sensor of Landsat TM is too coarse for monitoring

infrastructure, it is sufficient in determining significant spatial and temporal variations in the vegetation cover and urban environment.



## KASUTATUD KIRJANDUS

### Artiklid ja raamatud

Adams, J. B., Sabol, D. E., Kapos, V., Filho, R. A., Roberts., D. A., Smith, M. O., Gillespie, A. R., 1995. Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: application to land-cover change in the brazilian amazon. - Remote Sensing of Environment, 52 (2), 137-154.

Adams, J. B., Gillespie, A. R. 2006. Remote Sensing of Landscapes with Spectral Images. A Physical Modeling Approach. Cambridge: Cambridge University Press. 362 pp.

Antrop, M. 2004. Landscape change and the urbanization process in Europe. Landscape and Urban Planning, 67, 9–26.

Antrop, M. 2005. Why landscapes of the past are important for the future. Landscape and Urban Planning, 70, 21–34.

Gluch, R.R. 2006. Historical Evolution and Mapping of Human Settlements. – In: Remote Sensing of Human Settlements. / Ridd, M. K., Hipple, J. D. (ed.). 3rd ed, vol. 5. Bethesda, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 3-35.

Hipple, J. D. 2006. Characterizing and Mapping Human Settlements. - In: Remote Sensing of Human Settlements. / Ridd, M. K., Hipple, J. D. (ed.). 3rd ed, vol. 5. Bethesda, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 149-206.

Hung, M. 2002. Urban land cover analysis from satellite images. ISPRS Commission I. FIEOS 2002 Conference Proceedings.  
[<http://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/part1/paper/00099.pdf>] (viimati vaadatud 21.02.2013)

Kirss, O. 1980. Kohtla-Järve linn. – Rmt: Kirss, O., Joonuks, H., Pajos, L. Kohtla-Järve. Linn ja rajoon. Tallinn: Eesti Raamat, 44-61.

Kressler, F. P., Steinnocher, K. T. 1999. Detecting land cover changes from NOAA-AVHRR data by using spectral mixture analysis. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 1, 21-26.

Kärdi, T. 2007. Linnade kaugseire: spektrisegu lineaarne lahutamine Landsat Thematic Mapper satelliidipiltidelt Tartu linna näitel: Magistritöö. Tartu Ülikool, bioloogia-geograafia teaduskond, geograafia instituut, Tartu. 85 lk.

Kärdi, T. 2008. Vettpidava pinna suhtelise paiknemise kaardistamine spektrisegu lineaarse lahutamise meetodiga Tartu linna näitel. – Rmt: Väljataga, K., Kaukver, K. (toim.). Kaugseire Eestis. Tallinn: Iloprint, 123 -131.

Lu, D., Morana, E., Batistella, M. 2003. Linear mixture model applied to Amazonian vegetation classification. Remote Sensing of Environment, 87 (4), 456-469.

Lu, D., Weng, Q. 2006. Use of impervious surface in urban land-use classification. *Remote Sensing of Environment*, 102, 146-160.

Lunetta, R. S. 1998. Applications, project formulation, and analytical approach. In: Lunetta, R. S., Elvidge, C. D. (Eds). *Remote sensing change detection: Environmental monitoring methods and applications* (pp 1-19). Taylor & Francis.

Michishita, R., Jiang, Z., Xu, B. 2012. Monitoring two decades of urbanization in the Poyang Lake area, China through spectral unmixing. *Remote Sensing of Environment*, 117, 3-18.

Miller, R. B., Small, C. 2003. Cities from space: potential applications of remote sensing in urban environmental research and policy. *Environmental Science & Policy*, 6, 129-137.

Nichol, J. E. 1996. High-resolution surface temperature patterns related to urban morphology in a tropical city a satellite-based study. *Journal of Applied Meteorology*, 35, 135-146.

Nichol, J. 2009. Remote sensing of urban areas. – In: *The SAGE Handbook of Remote Sensing*. / Warner, T. A., Nellis, M. D., Foody, G. M. (ed.). London, SAGE Publications Ltd, 423-436.

Phinn, S., Stanford, M., Scarth, P., Murray, A. T., Shyy, P. T. 2002. Monitoring the composition of urban environments based on the vegetation-impervious surface-soil (VIS) model by subpixel analysis techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 4131-4153

Reimaa, V. 1996. Nõukogude võimu all. – Koguteos: Saaber, K. Virumaa. Lääne-Viru Maavalitsus, Ida-Viru Maavalitsus, 329-358.

Ridd, M.K. 1995. Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities. *International Journal of Remote Sensing*, 16 (12), 2165-2185.

Setiawan, H., Mathieu, R., Thompson-Fawcett, M. 2006. Assessing the applicability of the V-I-S model to map urban land use in the developing world: Case study of Yogyakarta, Indonesia. *Computers, Environment and Urban Systems*, 30, 503-522.

Small, C. 2001. Estimation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 22, 1305-1334.

Small, C. 2002. Multitemporal analysis of urban reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 81, 427-442.

Small, C., Miller, R. B. 2001. *Spatiotemporal Monitoring of Urban Vegetation*. Columbia University, USA.

[[http://www.ldeo.columbia.edu/~small/PDF/ISRSE\\_SmallMiller.pdf](http://www.ldeo.columbia.edu/~small/PDF/ISRSE_SmallMiller.pdf)] (viimati vaadatud 14.04.2012)

Taubenböck, H., Esch, T., Felbier, A., Wiesner, M., Roth, A., Dech, S. 2012. Monitoring urbanization in mega cities from space. *Remote Sensing of Environment*, 117, 162-176.

Ward, D., Phinn, S.R., Murray, A.L. 2000. Monitoring growth in rapidly urbanizing areas using remotely sensed data. *Professional Geographer*, 53 (3), 371–386.

Warner, T. A., Almutairi, A., Lee, J. Y. 2009. Remote Sensing of Land Cover Change. – In: *The SAGE Handbook of Remote Sensing*. / Warner, T. A., Nellis, M. D., Foody, G. M. (ed.). London, SAGE Publications Ltd, 459-472.

Weng, Q. 2012. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. *Remote Sensing of Environment*, 117, 34–49.

Weng, Q., Lu, D., Schubring, J. 2004. Estimation of land surface temperature – vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89, 467-483.

Wu, C. 2004. Normalized spectral mixture analysis for monitoring urban composition using ETM+ imagery. *Remote Sensing of Environment*, 93, 480–492.

Wu, C., Murray, A.T. 2003. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, 84, 493–505.

### **Internetiviited**

Encyclopaedia Britannica Online. 2013. Urbanization.  
[<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/619515/urbanization>] (viimati vaadatud 1.05.2013)

Jõhvi valla arengukava 2012-2020. Eelarvestrateegia 2013-2016. 2012  
[[http://www.johvi.ee/sites/default/files/failid/failid/arengukava\\_ja\\_eelarveareng\\_nov\\_2012.pdf](http://www.johvi.ee/sites/default/files/failid/failid/arengukava_ja_eelarveareng_nov_2012.pdf)] (viimati vaadatud 29.04.2013)

Kohtla-Järve linna arengukava 2007-2016. 2012  
[<http://www.kohtla-jarve.ee/uploads/documents/keskkonnakaitse/arengukava.pdf>] (viimati vaadatud 29.04.2013)

Narva turism. Ajalooline kohtumispaik. 2013  
[<http://tourism.narva.ee/?mid=20>] (viimati vaadatud 29.04.2013)

Narva linna arengukava 2008-2017. 2012  
[<http://web.narva.ee/files/4718.pdf>] (viimati vaadatud 29.04.2013)

USGS Global Visualization Viewer. 2013  
[<http://glovis.usgs.gov/>] (viimati vaadatud 22.04.2013)

World Urbanization Prospects, the 2011 Revision: Highlights. 2012. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division.  
[[http://esa.un.org/unup/pdf/WUP2011\\_Highlights.pdf](http://esa.un.org/unup/pdf/WUP2011_Highlights.pdf)] (viimati vaadatud 1.05.2013)

## LISAD

### LISA 1. Töös kasutatud Eesti Põhikaardi kaardilehed ja kaardistuse aasta

**Tabel 1.** Töös kasutatud Eesti Põhikaardi (EPK) kaardilehed ja kaardistuse aasta.

Linn/linnaosa	EPK kaardilehe number	Digitaalkaardistuse aasta
Jõhvi linn	64891	2006
	64892	2006
	64893	2006
	64894	2006
Järve linnaosa	64981	1999
	64982	1999
	64881	1999
	64883	1999
	64884	1999
Ahtme linnaosa	64891	2006
	64892	2006
	64793	2006
	64794	2006
Narva linn	64931	2007
	65932	2007
	65831	2007
	65832	2007
	65833	2007
	65834	2007
	65822	2007
	65824	2007

## LISA 2. Linlike objektide osakaal Eesti Põhikaardil ja Landsat piksleis

**Tabel 1.** Linlike objektide osakaal Eesti Põhikaardil ja Landsat piksleis Jõhvis.

Punkti nr	Eesti Põhikaart	Landsat
1	0.059	0.230
2	0.040	0.496
3	0.000	0.324
4	0.439	0.623
5	0.380	0.719
6	0.011	0.252
7	0.784	0.741
8	0.477	0.606
9	0.491	0.572
10	0.401	0.504
11	0.354	0.558
12	0.370	0.539
13	0.668	0.723
14	0.751	0.857
15	0.791	0.764
16	0.413	0.673
17	0.432	0.390

**Tabel 2.** Linlike objektide osakaal Eesti Põhikaardil ja Landsat piksleis Järve linnaosas.

Punkti nr	Eesti Põhikaart	Landsat
1	0	0.122
2	0	0.207
3	0.837	0.869
4	0.170	0.581
5	0.209	0.634
6	0.402	0.758
7	0.376	0.462
8	0.273	0.599
9	0.007	0.048
10	0.209	0.663
11	0.304	0.512
12	0.033	0.264
13	0.174	0.650
14	0.336	0.438
15	0.157	0.214
16	0.324	0.973
17	0.222	0.697
18	0.717	0.733

19	0.251	0.251
20	0	0.041
21	0.260	0.363
22	0.987	1
23	0.981	0.916
24	0	0.118
25	0.532	0.608
26	0.669	0.621
27	0.004	0.349
28	0.013	0.228
29	0.016	0.221
30	0.076	0.211
31	0.126	0.269

**Tabel 3.** Linlike objektide osakaal Eesti Põhikaardil ja Landsat piksleis Ahtme linnaosas.

Punkti nr	Eesti Põhikaart	Landsat
1	0	0.202
2	0.146	0.173
3	0.610	0.732
4	0.686	0.670
5	0.332	0.672
6	0.663	0.733
7	0.691	0.662
8	0.229	0.456
9	0.169	0.270
10	0.803	0.744
11	0.239	0.371
12	0.077	0.338
13	1	0.910
14	0.052	0.263
15	1	0.914
16	0.007	0.123
17	0	0.173
18	0.881	0.864
19	0.038	0.729
20	0.349	0.554
21	0.184	0.204
22	0	0.343

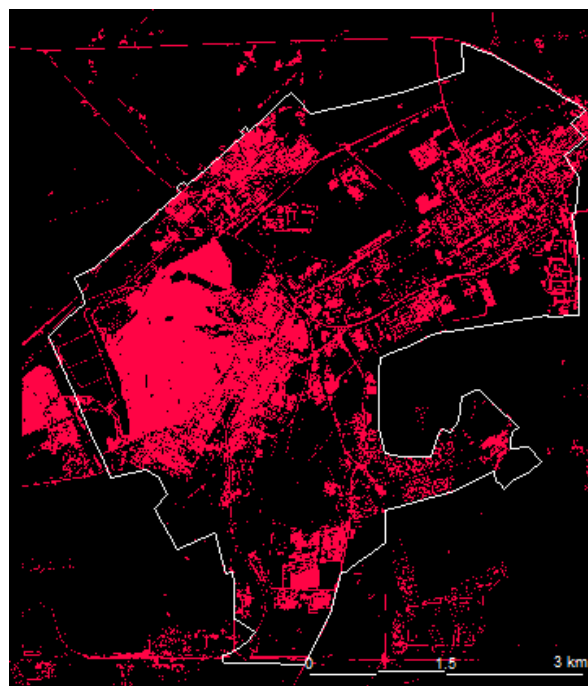
**Tabel 4.** Linlike objektide osakaal Eesti Põhikaardil ja Landsat piksleis Narva linnas.

Punkti nr	Eesti Põhikaart	Landsat
1	0	0.103

2	0	0.219
3	0.039	0.160
4	0	0.067
5	0	0.089
6	0.059	0.060
7	0.006	0.247
8	0	0.118
9	0.061	0.213
10	0	0.269
11	0.543	0.234
12	0.019	0.132
13	0.433	0.407
14	0.217	0.577
15	0	0.057
16	0.298	0.220
17	0.640	0.438
18	0.643	0.571
19	0.776	0.644
20	0.411	0.440
21	0.803	0.493
22	0.536	0.444
23	0.343	0.433
24	0.841	0.473
25	0.720	0.367
26	0.041	0.362
27	0	0.112
28	0.228	0.271



### LISA 3. Linlikku keskkonda esindavad alad

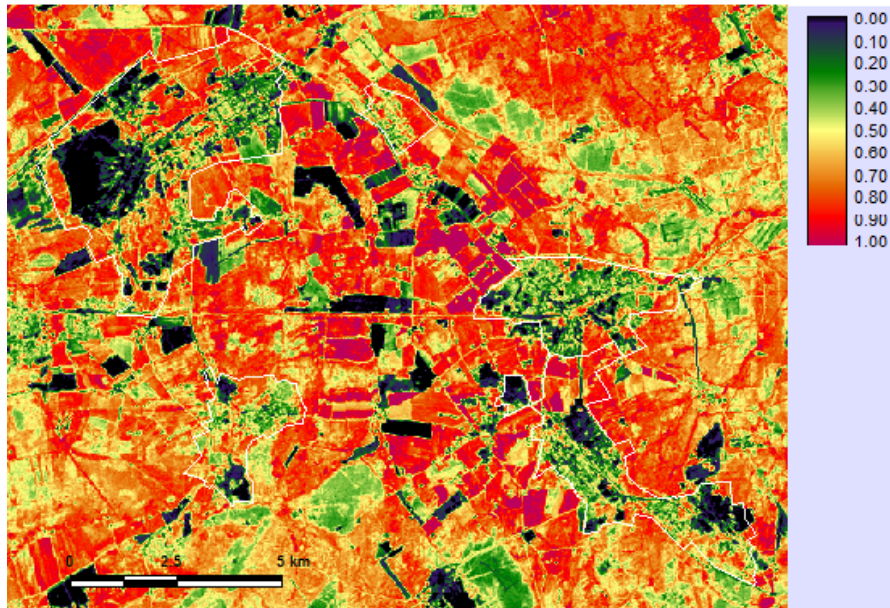


**Joonis 1.** Eesti Põhikaardi ja mooduli ISOCLUST teel saadud linliku keskkonda esindavad alad Ahtme linnaosas (vasakul) ja Järve linnaosas (paremal).

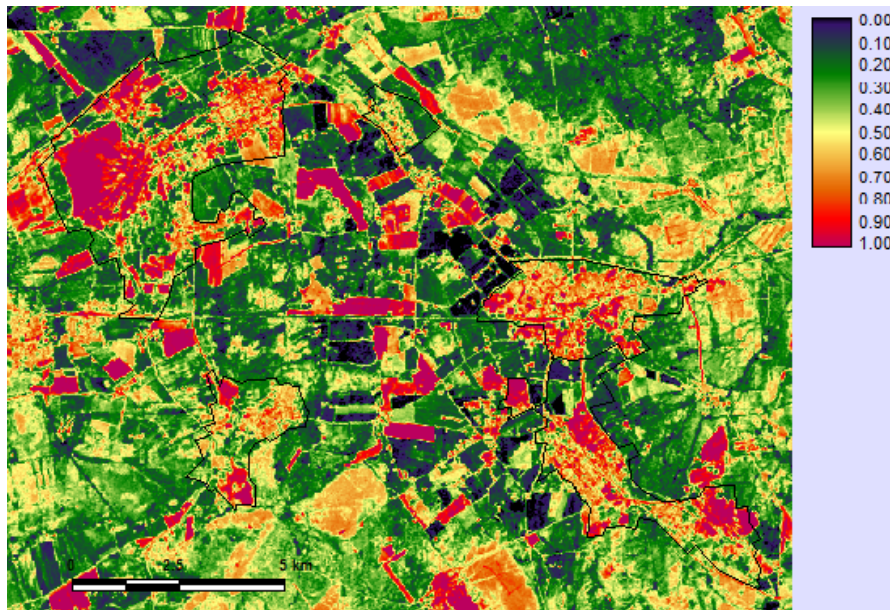


**Joonis 2.** Eesti Põhikaardi ja mooduli ISOCLUST teel saadud linliku keskkonda esindavad alad Narva linnas.

#### LISA 4. Spektrisegu lahutamise 1985. aasta tulemused

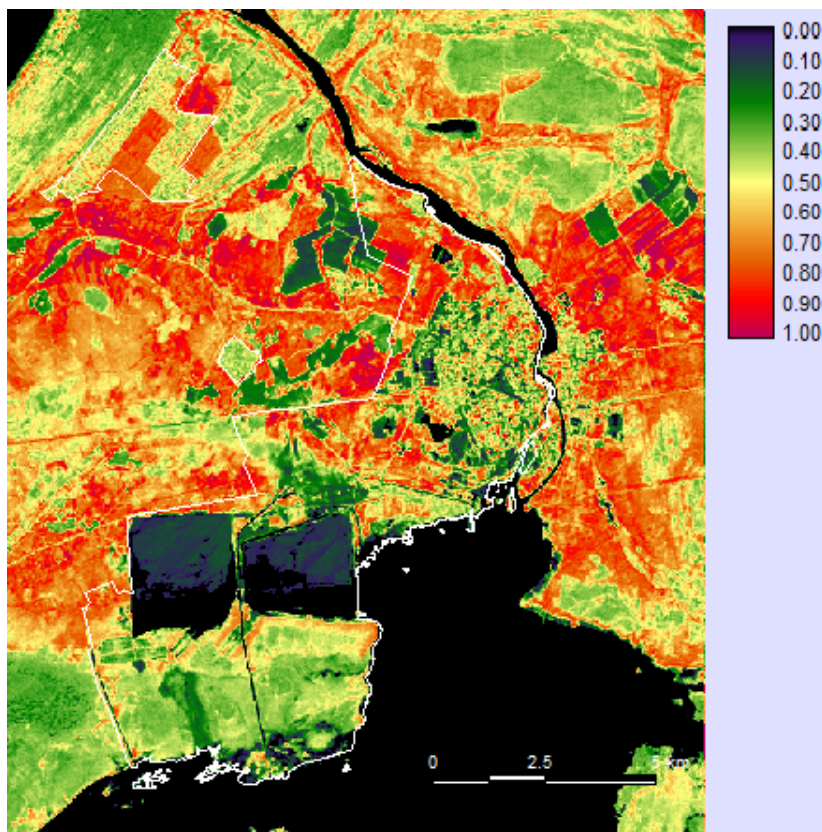


**Joonis 1.** 1985. aasta spektrisegu lahutamise tulemus Jõhvi ja Kohtla-Järve linnaosadest ning nende ümbrusest. Numbrilised väärtused esindavad sarnasust rohelise taimkatte algliikmega pikslites.

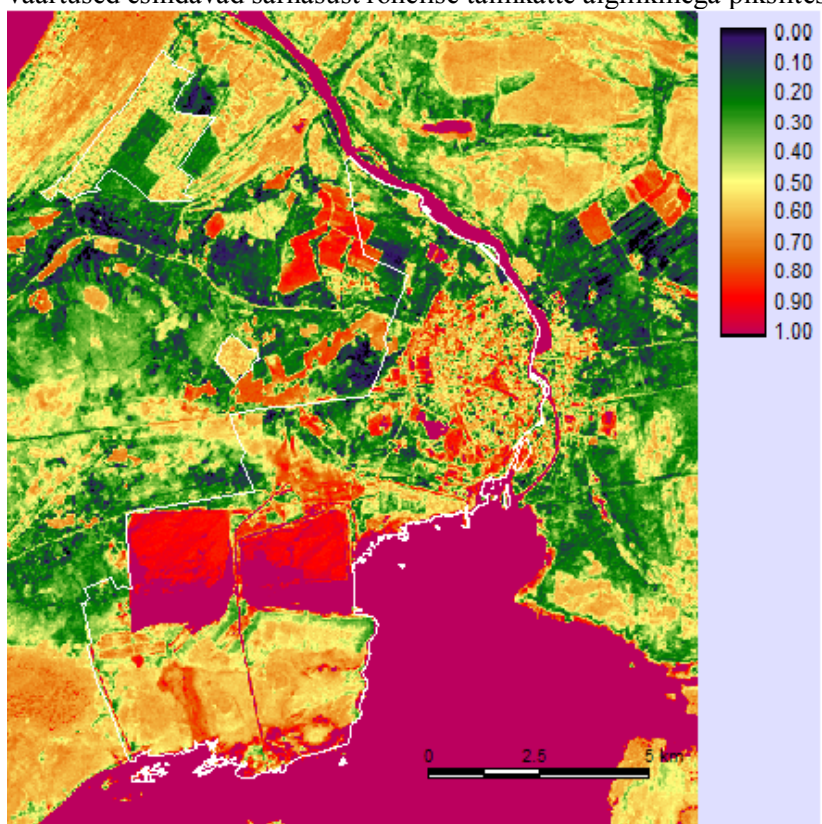


**Joonis 2.** 1985. aasta spektrisegu lahutamise tulemus Jõhvi ja Kohtla-Järve linnaosadest ning nende ümbrusest. Numbrilised väärtused esindavad sarnasust linliku keskkonna algliikmega pikslites.



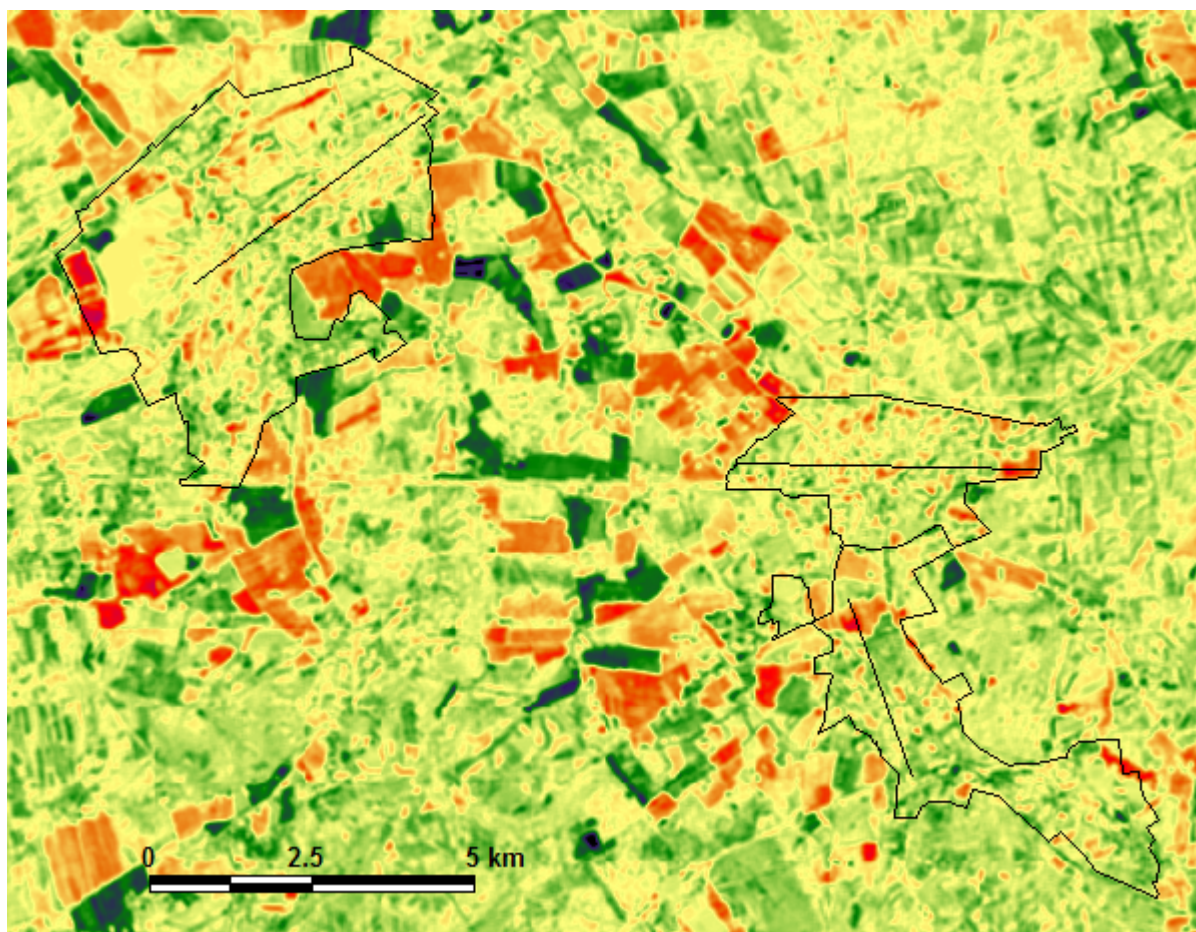


**Joonis 3.** 1985. aasta spektrisegu lahutamise tulemus Narva linnast ning lähiümbrusest. Numbrilised väärtused esindavad sarnasust rohelise taimkatte algliikmega pikslites.



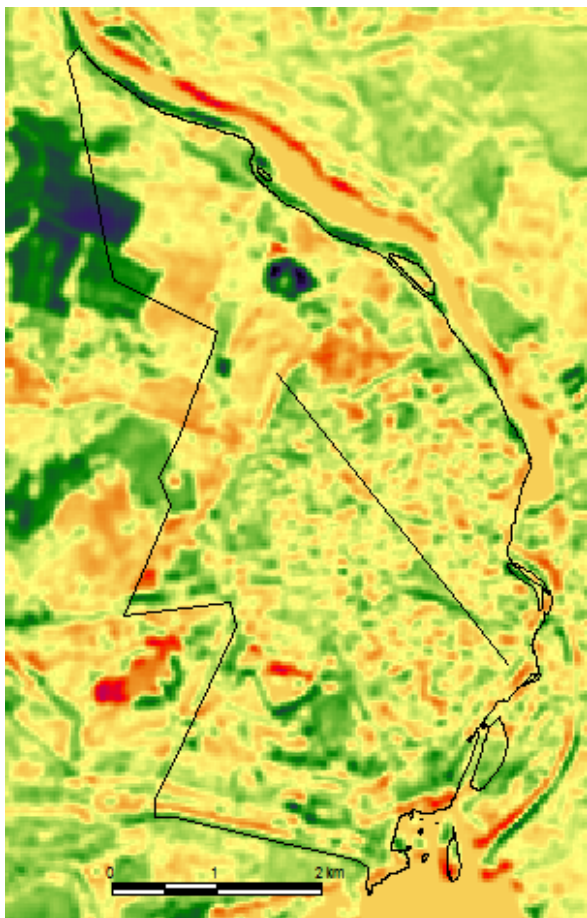
**Joonis 4.** 1985. aasta spektrisegu lahutamise tulemus Narva linnast ning lähiümbrusest. Numbrilised väärtused esindavad sarnasust linliku keskkonna algliikmega pikslites.

**LISA 5. Aastate 1985 kuni 2011 vahemikus toimunud linliku keskkonna muutused**



**Joonis 1.** Jõhvi linnas, Järvel ja Ahtme linnaosas 1985 kuni 2011. a toimunud linliku keskkonna muutused. Profiiljoon on esitatud sirge joonena linnapiiride sees.

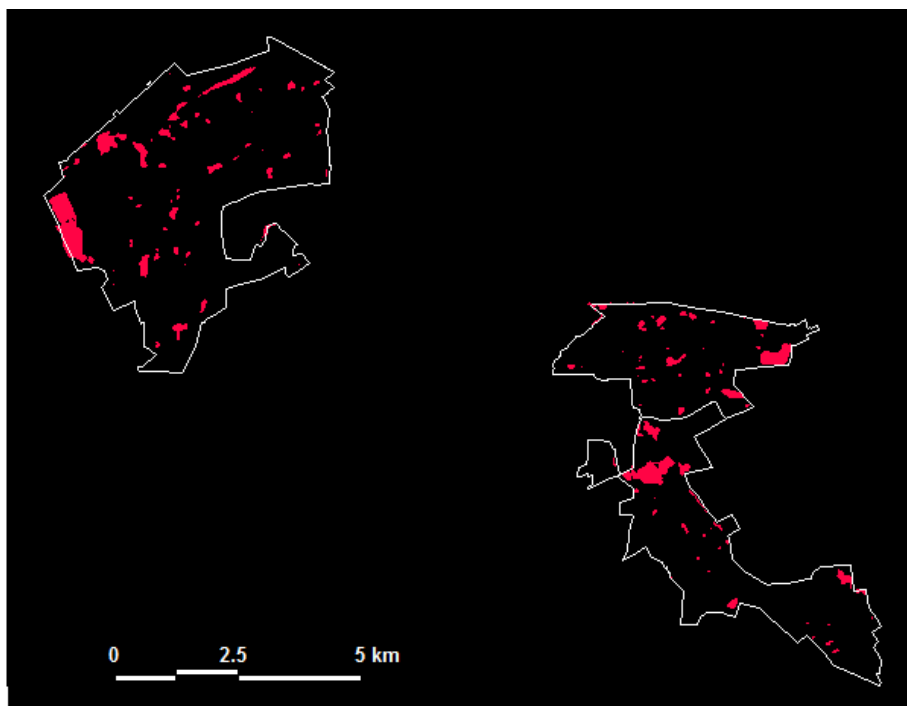




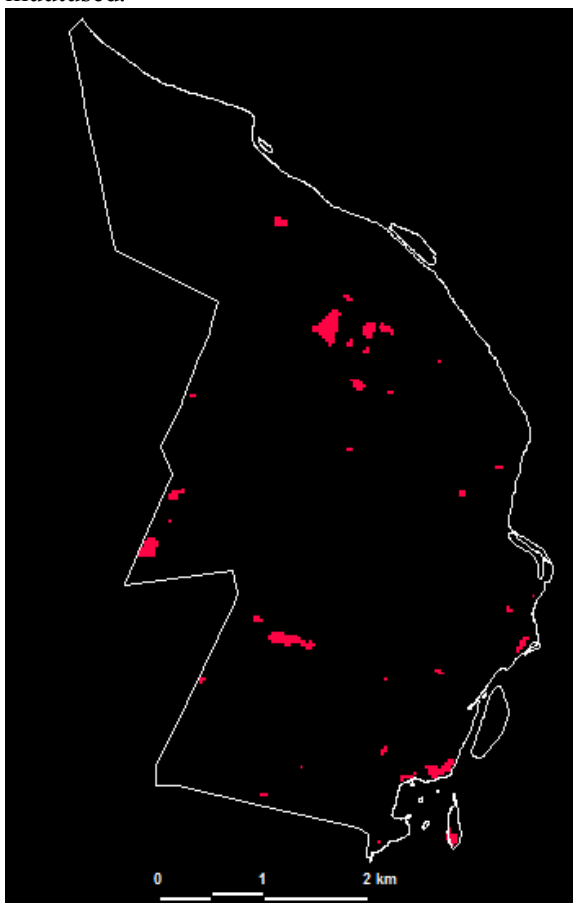
**Joonis 2.** Narva linnas 1985 kuni 2011. a toimunud linliku keskkonna muutused. Profiiljoon on esitatud sirge joonena linnapiiride sees.



## LISA 6. Lävendit ületavad muutused Kohtla-Järvel ja Narvas



**Joonis 1.** Jõhvi linnas, Järvel ja Ahtmes 1985 kuni 2011. a linliku keskkonna üle 0,2 toimunud muutused.



**Joonis 2.** Narva linnas 1985 kuni 2011. a linliku keskkonna üle 0,2 toimunud muutused.

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina,  
(sünnikuupäev: 13.12.1987)

Kaidi Erik  
(*autori nimi*)

annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Ida-Virumaa linnades toimunud muutused spektraalse segu lahutamise meetodil,  
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendajad on Urmas Peterson ja Ülo Mander,  
(*juhendaja nimi*)

reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni; üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 20.05.2013 (*kuupäev*)